

Agrociencia

Volumen 55, Número 2

16 de febrero - 31 de marzo, 2021



Ing. GILBERTO PALACIOS DE LA ROSA
(1913-1973)

Universidad Autónoma Chapingo



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL

MÉXICO



DIRECTORIO

DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Said Infante Gil

SUBDIRECTORA DE AGROCIENCIA

Ana Rita Román Jiménez

CONSEJO EDITORIAL INTERNACIONAL

Roger Austin (**Inglaterra**)

José Sarukhán Kermez (**México**)

Barry C. Arnold (**EUA**)

COMITÉ ASESOR EDITORIAL INTERNO

Jorge Alvarado López

Jorge D. Etchevers Barra

Víctor A. González Hernández

Leopoldo E. Mendoza Onofre

José A. Villaseñor Alva

RESPONSABLES DE LA EDICIÓN

Said Infante Gil

Ana Rita Román Jiménez

FORMACIÓN, DISEÑO Y MAQUETACIÓN

Brenda Espejel Lagunas

APOYO

Belem M. Villegas Contreras

Yolanda Feroso Meraz

Oscar Vieyra Durán

DERECHOS DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS, **Volumen 55, número 2, 16 de febrero - 31 de marzo, 2021**, Agrociencia es una publicación sesquimensual editada por el Colegio de Postgraduados. Carretera México- Texcoco, Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México. CP 56230. Tel. 5959284427. www.colpos.mx. Editor responsable: **Dr. Said Infante Gil**. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo en trámite. ISSN: 2521-9766, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Dr. Said Infante Gil. Fecha de última modificación, **31 de marzo del 2021**.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

AGROCIENCIA está indexada en CURRENT CONTENTS®/AGRICULTURE, BIOLOGY & ENVIRONMENTAL SCIENCES® (CC/AB&ES), ISI ALERTING SERVICES®, el SCIENCE CITATION INDEX EXPANDED® (SCIE) y el JOURNAL CITATION REPORTS® del INSTITUTE FOR SCIENTIFIC INFORMATION (ISI), THE USDA-IBIDS ABSTRACTS, THE ESSENTIAL ELECTRONIC AGRICULTURAL LIBRARY (TEAL), CURRENT INDEX TO STATISTICS, AGRICULTURE AND ENVIRONMENT FOR DEVELOPING REGIONS (TROPAG), AGRICULTURAL BIOLOGY, CAB ABSTRACTS, ZOOLOGICAL RECORD, PERIODICA, RED DE REVISTAS CIENTÍFICAS DE AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE (Red ALyC) y ScieELOMéxico; puede consultarse a través de AGRIS (FAO), AGRICOLA (EE. UU.), BIOSIS (HOLANDA) y DIRECTORY OF OPEN ACCESS JOURNALS (SUECIA).

AGROCIENCIA está incluida en el ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA del CONACYT.

Toda correspondencia (información de suscripciones, ventas, publicidad, contribuciones de autores, etc.) deberá dirigirse a:

Oficinas Centrales:

DIRECTOR DE AGROCIENCIA

Guerrero #9, Esquina Avenida Hidalgo.

56220. San Luis Huexotla. Texcoco, Estado de México

Apartado Postal 56

56230, Suc. Chapingo, Estado de México

Teléfono: 595 92 84427

agrociencia@colpos.mx

<http://www.colpos.mx/agrociencia/agrociencia.htm>

Aviso: Los nombres comerciales citados en los artículos, notas o ensayos, de ninguna manera implica patrocinio por parte de Agrociencia, ni crítica alguna a otros productos similares.

Portada: Ing. Gilberto Palacios de la Rosa
Universidad Autónoma Chapingo



SADER

SECRETARÍA DE AGRICULTURA
Y DESARROLLO RURAL

CONTENIDO ❖ CONTENTS

Volumen 55

16 de febrero - 31 de marzo, 2021

Número 2

Agua-Suelo-Clima ⇌ Water-Soil-Climate

ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS NO AFORADAS POR EL MODELO HIDROLÓGICO CEQUEAU
 ⇌ STREAMFLOW ESTIMATION IN UNGAUGED WATERSHEDS BY THE CEQUEAU HYDROLOGICAL
 MODEL
 Francisco **Magaña-Hernández**, Ana Cristel **Muñoz-Gómez**, Rene Sebastián **Mora-Ortíz**, Leobardo Alejandro **Quiroga**,
 Víctor Hugo **Guerra-Cobián** 99

ALTERNATIVA PROBABILÍSTICA BAYESIANA PARA UNA ESTIMACIÓN MEJOR DEL COEFICIENTE DE
 CULTIVO BASADO EN ÍNDICES DE VEGETACIÓN ⇌ A BAYESIAN PROBABILISTIC ALTERNATIVE FOR
 A BETTER ESTIMATION OF THE CROP COEFFICIENT BASED ON VEGETATION INDEXES
 Víctor Manuel **Salas-Aguilar**, María Elena **Torres-Olave**, Hugo Luis **Rojas-Villalobos**, Luis Carlos **Alatorre-Cejudo**, Luis
 Carlos **Bravo-Peña** 117

Biotecnología ⇌ Biotechnology

6-BENZYLAMINOPURINE AND 2, 4-DICHLOROPHENOXYACETIC ACID EFFECT ON CALLUS GENESIS
 OF *Brosimum alicastrum* ⇌ EFECTO DE 6-BENCILAMINOPURINA Y ÁCIDO 2,4-DICLOROFENOXYACÉ-
 TICO EN LA CALLOGÉNESIS DE *Brosimum alicastrum*
 Angel Virgilio **Domínguez-May**, José Augusto **Nah-Hau**, Israel **García-Sheseña**, Sara Luz **Nahuat-Dzib**, José Luis
Giorgana-Figueroa, Estefanía **Escalante-Zapata**, José Efraín **Ramírez-Benítez**, Ana Paula **Gamba-Galeazzis** 133

Matemáticas Aplicadas, Estadística y Computación ⇌ Applied Mathematics-Statistics-Computer Science

COMPARATIVE STUDY OF THE USE OF RAW AND TREATED CASSAVA AND LEMON RESIDUES IN THE
 NICKEL (II) REMOVAL ⇌ ESTUDIO COMPARATIVO DEL USO DE RESIDUOS DE MANDIOCA Y LI-
 MÓN CRUDOS Y TRATADOS EN LA REMOCIÓN DE NÍQUEL (II)
 Candelaria **Tejada-Tovar**, Diofanor **Acevedo**, Angel **Villabona-Ortíz**, Nórdida **Pájaro-Gómez**, María **Otero** 145

Socioeconomía ⇌ Socioeconomics

MANEJO CAMPESINO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN HORTO-FLORÍCOLAS: ESTUDIO DE CASO ⇌
 PEASANT MANAGEMENT OF HORTI-FLORISTIC SYSTEM: CASE STUDY
 Ximena **Castillo**, Jorge D. **Etchevers**, Arturo **Aguirre**, Claudia **Hidalgo** 159

CONDICIONES LABORALES Y VALORACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD SOCIAL EN EMPRESAS AGRÍCO-
 LAS DEL MUNICIPIO DE ELOTA, SINALOA, MÉXICO ⇌ LABOR CONDITIONS AND SOCIAL RESPON-
 SIBILITY ASSESSMENT AT AGRICULTURAL COMPANIES IN THE MUNICIPALITY OF ELOTA, SINALOA,
 MÉXICO
 Belem Dolores **Avendaño Ruiz**, Karina Adalessa **Bañuelos-Torrontegui**, Federico **Martínez-Carrasco Pleite** 177

ESTIMACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS NO AFORADAS POR EL MODELO HIDROLÓGICO CEQUEAU

STREAMFLOW ESTIMATION IN UNGAUGED WATERSHEDS BY THE CEQUEAU HYDROLOGICAL MODEL

Francisco **Magaña-Hernández**¹, Ana Cristel **Muñoz-Gómez**¹, Rene Sebastián **Mora-Ortíz**¹,
Leobardo Alejandro **Quiroga**¹, Víctor Hugo **Guerra-Cobián**²

¹Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ingeniería y Arquitectura,
Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez Km 1, La Esmeralda. 86690 Cunduacán, Tabasco.

²Instituto de Ingeniería Civil de la UANL, Ciudad Universitaria. 66450 San Nicolás de los
Garza, Nuevo León, México. (francisco.magana@ujat.mx).

RESUMEN

El agua es un recurso natural fundamental para la vida en la Tierra y es el componente básico del ciclo hidrológico. La evaluación de la cantidad de agua disponible en una cuenca es un requisito para el desarrollo y administración de los recursos hídricos, ya sea para suministrar agua a la población, agricultura, industria o para la producción de energía. La modelación hidrológica es una de las herramientas principales usadas para estimar caudales en cuencas no aforadas. En este estudio se aplicó el modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para estimar los caudales en cuatro sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa para el periodo de 1965 a 1999. Para la evaluación de la eficiencia del modelo se usaron tres estadísticas: el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*), el porcentaje de sesgo (*PBIAS*) y el coeficiente de determinación (*R*²). De acuerdo con los criterios estadísticos el modelo es muy bueno. CEQUEAU realizó simulaciones con una buena respuesta natural de los escurrimientos de la cuenca.

Palabras clave: Río Tacotalpa; CEQUEAU; cuencas no aforadas

INTRODUCCIÓN

El agua dulce es un elemento vital para todas las formas de vida y es necesario determinar su variación en el tiempo. De gran importancia es conocer estos volúmenes en diferentes puntos de río en función del tiempo; ello es crucial para la planeación, diseño y gestión de los recursos hídricos en una cuenca, el diseño de infraestructura hidráulica, pronóstico de inundaciones, operación hidroeléctrica,

ABSTRACT

Water is a fundamental natural resource for life on Earth and is the basic component of the hydrological cycle. The evaluation of the amount of available water in a watershed is a requirement for development; and administration of the hydric resources whether it is for supplying water to the population, agriculture, industry or for energy production. Hydrological modeling is one of the principal tools used for estimating flows in ungauged watersheds. In this study the CEQUEAU distributed hydrological model was applied to estimate the flows in four ungauged sites of the Tacotalpa river watershed for the period 1965 to 1999. For the evaluation of the efficiency of the model, three statistics were used: the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (*NSE*), the percent bias (*PBIAS*) and the determination coefficient (*R*²). According to the statistical criteria, the model is very good. CEQUEAU made simulations with a good natural response of the flows of the watershed.

Key words: Tacotalpa River, CEQUEAU; ungauged watersheds

INTRODUCTION

Fresh water is a vital element for all forms of life and it is necessary to determine its variation over time. It is of great importance to know these volumes in different points of the river as a function of time. This is crucial for the planning, design and management of the hydric resources in a watershed, the design of hydraulic infrastructure, prediction of floods, hydroelectric operation, among others (Loukas and Vasiliades, 2014; Xie *et al.*, 2014; Swain *et al.*, 2017; Chiew *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018).

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.

Recibido: mayo, 2020. Aprobado: septiembre, 2020.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 55: 99-115. 2021.

DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2389>

entre otros (Loukas y Vasiliades, 2014; Xie *et al.*, 2014; Swain *et al.*, 2017; Chiew *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018).

En muchas regiones del mundo las cuencas no tienen registros hidrométricos o están incompletos, y en algunos casos las redes de medición existentes disminuyen. Por lo anterior, las estimaciones de caudales en corrientes continuas en cuencas no aforadas, o con poca información hidrométrica son muy inciertas (Tsegaw *et al.*, 2019). La comunidad internacional reconoce este problema; por eso la Asociación Internacional de Ciencias Hidrológicas (IAHS) puso en funcionamiento durante la década de 2003-2012 la iniciativa, “*predicción en cuencas no aforadas*”. El fin fue implementar programas científicos de manera coordinada, para reducir la incertidumbre en las predicciones hidrológicas.

Los modelos lluvia-escorrentamiento se usan en hidrología para diseñar aplicaciones hidrológicas (Li *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018; Zelelew y Melesse, 2018). De acuerdo con Bà *et al.* (2001), la evaluación de los recursos hídricos en una cuenca se puede realizar con un modelo hidrológico distribuido. Este tipo de modelos toma en cuenta la variabilidad espacial de la lluvia y de otros parámetros en una cuenca, al dividirla en una malla de cuadros (Bà *et al.*, 2001; Devi *et al.*, 2015).

Hay estudios de modelos hidrológicos distribuidos para la estimación de caudales en cuencas no aforadas. Por ejemplo, la simulación de caudales de una subcuenca del Lago Tonle Sap en Camboya con el modelo SWAT (Ang y Oeurng 2018); la estimación de caudales con el modelo CREST, en afluentes no aforados del río Yangtze (China) con precipitación estimada por satélite (Gao *et al.*, 2017); el pronóstico de inundaciones repentinas en EUA con el modelo HL-RDHM (Reed *et al.*, 2007); la simulación de escorrentamientos en subcuencas del río Abbay en el noroeste de Etiopía con el modelo HEC-HMS (Zelelew y Melesse 2018).

En México, los modelos hidrológicos más usados son: el HEC-HMS para eventos aislados (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020), CEQUEAU y SWAT para simulaciones continuas (Bà *et al.*, 2001; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Mercado *et al.*, 2015). El modelo CEQUEAU se utilizó en algunos países bajo condiciones climáticas diversas (Bà *et al.*, 2013; Boisvert *et al.*, 2016; Dugdale *et al.*, 2017; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017; Bà *et al.*, 2018a; y Bà *et al.*, 2018b), y

In many regions of the world, watersheds do not have hydrometric registry, or they are incomplete, and in some cases the existing measurement networks are diminished. Therefore, the estimations of continuous flows in ungauged watersheds, or with scant hydrometric information are very uncertain (Tsegaw *et al.*, 2019). The international community recognizes this problem; thus, the International Association of Hydrological Sciences (IAHS) launched the initiative “*prediction in ungauged watersheds*” during the decade of 2003-2012. The objective was to implement scientific programs in a coordinated way, to reduce the uncertainty in the hydrological predictions.

The rainfall-runoff models are used in hydrology to design hydrological applications (Li *et al.*, 2018; Moiz *et al.*, 2018; Zelelew and Melesse, 2018). According to Bà *et al.* (2001), the evaluation of the hydric resources in a watershed can be made with a distributed hydrological model. This type of model accounts for the spatial variability of rainfall and There are studies of distributed hydrological models for the estimation of flows in ungauged watersheds. For example, the simulation of flows of a sub-basin of Lake Tonle Sap in Cambodia with the SWAT model (Ang and Oeurng, 2018); the estimation of flows with the CREST model, in ungauged tributaries of the Yangtze River (China) with precipitation estimated by satellite (Gao *et al.*, 2017); the prediction of flash floods in the U.S. with the model HL-RDHM (Reed *et al.*, 2007); the simulation of runoffs in sub-basins of the Abbay River in northwestern Ethiopia with the model HEC-HMS (Zelelew and Melesse, 2018).

In Mexico, the most frequently used hydrological models are as follows: the HEC-HMS for isolated events (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020), CEQUEAU and SWAT for continuous simulations (Bà *et al.*, 2001; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Díaz-Mercado *et al.*, 2015). The CEQUEAU model was used in some countries under diverse climatic conditions (Bà *et al.*, 2013; Boisvert *et al.*, 2016; Dugdale *et al.*, 2017; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017; Bà *et al.*, 2018a; Bà *et al.*, 2018b), and in Mexico it is used in hydrological investigations by region and the results are satisfactory (Bà *et al.*, 2001; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Díaz-Mercado *et al.*, 2015; Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

As with other models used in Mexico, CEQUEAU is a model of free use and easy access (Magaña-

en México se usa en investigaciones hidrológicas por región y los resultados son satisfactorios (Bà *et al.*, 2001; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Díaz-Mercado *et al.*, 2015; Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

Al igual que otros modelos usados en México, CEQUEAU es un modelo de uso libre y de acceso fácil, (Magaña-Hernández *et al.*, 2013; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020). La información de entrada requerida por CEQUEAU está disponible en bases de datos administradas por algunas dependencias en México. Entre los estudios con CEQUEAU documentados en México están: la simulación de los caudales medios diarios del en el río Amacuzac y San Jerónimo en el estado de México (Bà *et al.*, 2001); la simulación de los caudales medios diarios en la cuenca del río La Sierra en Chiapas y Tabasco (Díaz-Mercado *et al.*, 2015); en la cuenca del río Escondido en Coahuila, para estimar los caudales pico con precipitación estimada por radar (Guerra-Cobián *et al.*, 2011).

CEQUEAU es un modelo conceptual distribuido que toma en cuenta las características físicas de la cuenca y sus variaciones en el espacio, y con él se calculan los caudales en los sitios de aforo y en cualquier lugar de la cuenca. Además, se puede simular la existencia de embalses artificiales como presas, desvíos, etc. (Morin y Paquet, 2007). Otros estudios en México, el efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudales, en cuencas con diferentes regímenes climatológicos (Guerra-Cobián *et al.*, 2013); y la integración de datos diarios de precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos, para simular los caudales de la cuenca del río Amacuzac (Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

El conocimiento del caudal en diferentes sitios del río Tacotalpa tiene gran importancia en planificación de recursos hídricos, dimensionamiento de obras hidráulicas, control de inundaciones, pronóstico hidrológico, abastecimiento de agua potable, y evaluación de impacto ambiental. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue la estimación de caudales en cuatro sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa (CTpj) con el uso del modelo hidrológico distribuido CEQUEAU para el periodo de datos de 1965 a 1999. La hipótesis fue que el modelo CEQUEAU, una vez calibrado y validado, puede reproducir el comportamiento de los escurrimientos en sitios no aforados.

Hernández *et al.*, 2013; Salas-Martínez *et al.*, 2014; Vargas-Castañeda *et al.*, 2017; Espinoza-López *et al.*, 2020). The input information required by CEQUEAU is available in databases administered by institutions in Mexico. Among the studies with CEQUEAU documented in Mexico are the following: the simulation of average daily flows in the Amacuzac River and San Jerónimo in the state of Mexico (Bà *et al.*, 2001); the simulation of the average daily flows in the basin of La Sierra River (Chiapas-Tabasco, Mexico) (Díaz-Mercado *et al.*, 2015); and the Escondido River in Coahuila, for estimating the peak flows with rainfall estimated by radar (Guerra-Cobián *et al.*, 2011).

CEQUEAU is a distributed conceptual model that integrates the physical characteristics of the watershed and their variations in space. With it, the flows are calculated in the capacity sites and anywhere in the watershed. Furthermore, the existence of artificial catchments such as dams, diversions, etc. can be simulated (Morin and Paquet, 2007). Other studies in Mexico include the effect of the special discretization over the simulations of flows, in watersheds with different climatological regimens (Guerra-Cobián *et al.*, 2013); and the integration of daily data of rainfall estimated with hydrometeorological sensors, for simulating the flows of the Amacuzac River basin (Vilchis-Mata *et al.*, 2015).

Knowledge of the streamflow in different sites of the Tacotalpa River has great importance on planning hydric resources, projecting dimensions of hydraulic works, flood control, hydrological prediction, supply of drinking water, and evaluation of environmental impact. Thus, the objective of this study was the estimation of flows in four ungauged sites in the watershed of the Tacotalpa River (CTpj) using the distributed hydrological model CEQUEAU for the period of data from 1965 to 1999. The hypothesis was that the CEQUEAU model, once calibrated and validated, can reproduce the behavior of the runoff in ungauged sites.

MATERIALS AND METHODS

Study zone

The Tacotalpa River is a tributary of the La Sierra River, its source is in the central plateau of Chiapas, Mexico (Figure 1). The

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona en estudio

El río Tacotalpa es un afluente del río La Sierra, nace en la meseta central de Chiapas, México (Figura 1). La cuenca drena una superficie de 3219 km² hasta la estación hidrométrica Tapijulapa (UTpj) con clave 30093 definida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). El cauce principal tiene 102 km de longitud con una pendiente promedio de 0.93%, y tiempo de concentración de 0.589 d. El clima dominante en la cuenca es el cálido húmedo con lluvias abundantes en verano y temperatura promedio de 26 °C. La precipitación media anual en la cuenca varía de 1500 a 4000 mm.

Datos meteorológicos

Estos datos son la entrada básica en cualquier modelo lluvia-escorrentamiento (precipitación, temperatura máxima y mínima) y se usó información de 34 estaciones meteorológicas de la base de datos Clima Computarizado (CLICOM) de 1965 a 1999.

watershed drains a surface of 3219 km² as far as the hydrometric station Tapijulapa (UTpj) with code 30093 within the National Water Commission (CONAGUA). The main river is 102 km long with an average slope of 0.93%, and concentration time of 0.589 d. The dominant climate in the basin is warm humid with abundant rains in summer and average temperature of 26 °C. The mean annual rainfall in the basin varies from 1500 to 4000 mm.

Meteorological data

These data are the basic input in any rainfall-runoff model (precipitation; maximum, and minimum temperature), and information of 34 meteorological stations was used from the data base Computerized Climate (CLICOM) from 1965 to 1999.

Hydrometric data

Hydrometric records are necessary in the calibration and validation of a hydrological model. The hydrometric information used was of daily average flows of the hydrometric stations Tapijulapa (UTpj) and Oxolotán (UOxo) of the period 1965 to 1999.

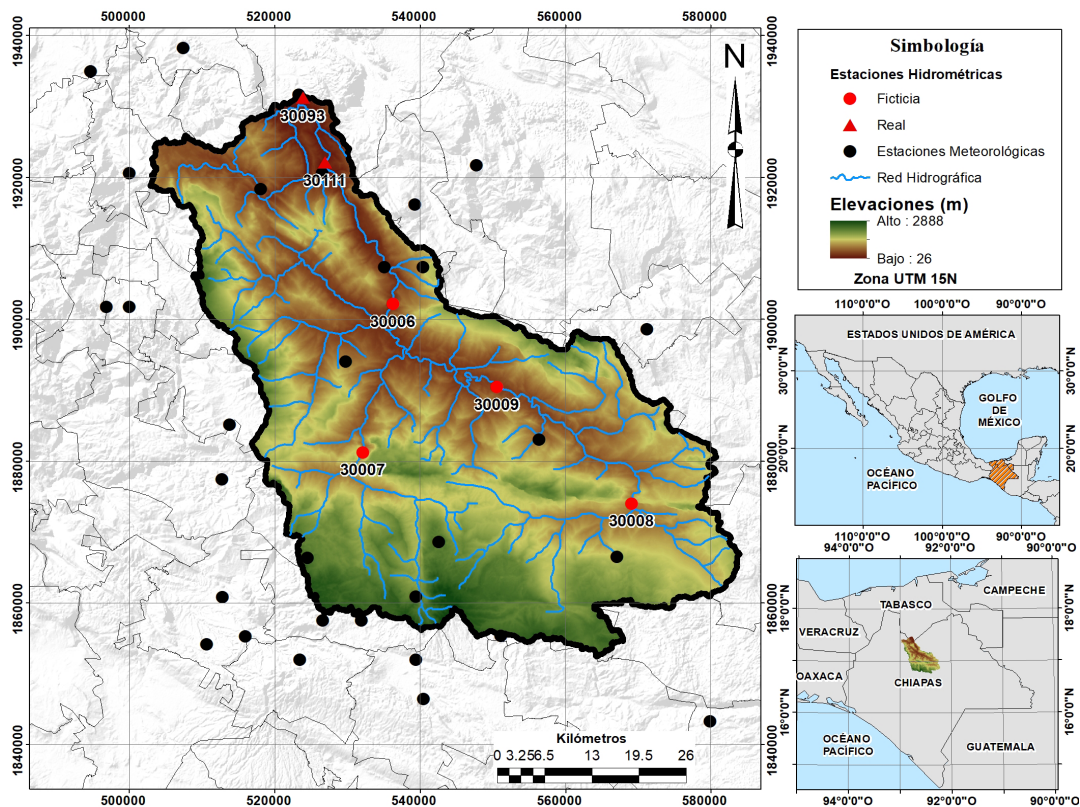


Figura 1. Zona en estudio.
Figure 1. Study zone.

Datos hidrométricos

Los registros hidrométricos son necesarios en la calibración y validación de un modelo hidrológico. La información hidrométrica utilizada fue de caudales medios diarios de las estaciones hidrométricas Tapijulapa (UTpj) y Oxolotán (UOxo) del periodo 1965 a 1999.

Datos topográficos

La topografía terrestre puede representarse con Modelos Digital de Elevación (MDE), los cuales representan las elevaciones del terreno por medio de valores numéricos. En este estudio se utilizó un MDE del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) con una resolución de píxel de 90 x 90 m, y en la Figura 2A se presenta el MDE delimitado por el polígono de la cuenca en estudio.

Datos de cobertura de suelo

El modelo CEQUEAU requiere información de cobertura de suelo para realizar la modelación hidrológica. El mapa usado fue de cobertura de suelo escala 1: 250 000 del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). El mapa se reclasificó en las cuatro categorías que utiliza el modelo (Figura 2B): 1) tipo 1: lagos y cuerpos de agua, 2) tipo 2: bosques y selvas, 3) tipo 3: ciénegas y pantanos, y 4) tipo 4: otros.

Topographic data

The terrestrial topography can be represented with Digital Elevation Models (MDE), which represent the elevations of the terrain by means of numerical values. In this study, the Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM, Jarvis *et al.*, 2008) MDE was used with a pixel resolution of 90 x 90 m, and the MDE limited polygon of the watershed of study is shown in Figure 2A.

Soil cover data

The CEQUEAU model requires information of soil cover to attain the hydrological modelling. The soil cover map used was of scale 1: 250 000 from the Mexican Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). The map was reclassified in the four categories used by the model (Figure 2B): 1) type 1: lakes and bodies of water, 2) type 2: temperate and tropical forests, 3) type 3: swamps, and 4) type 4: others.

Hydrological model

The CEQUEAU model was selected to simulate the rainfall-runoff process of the CTpj, for a daily time passage of the period from 1965 to 1999. CEQUEAU was developed in the National Institute of Scientific Water Research (INRS-EAU, now INRS-ETE) of the University of Quebec, Canada (Morin and Paquet, 1995). CEQUEAU is part of the hydrological models

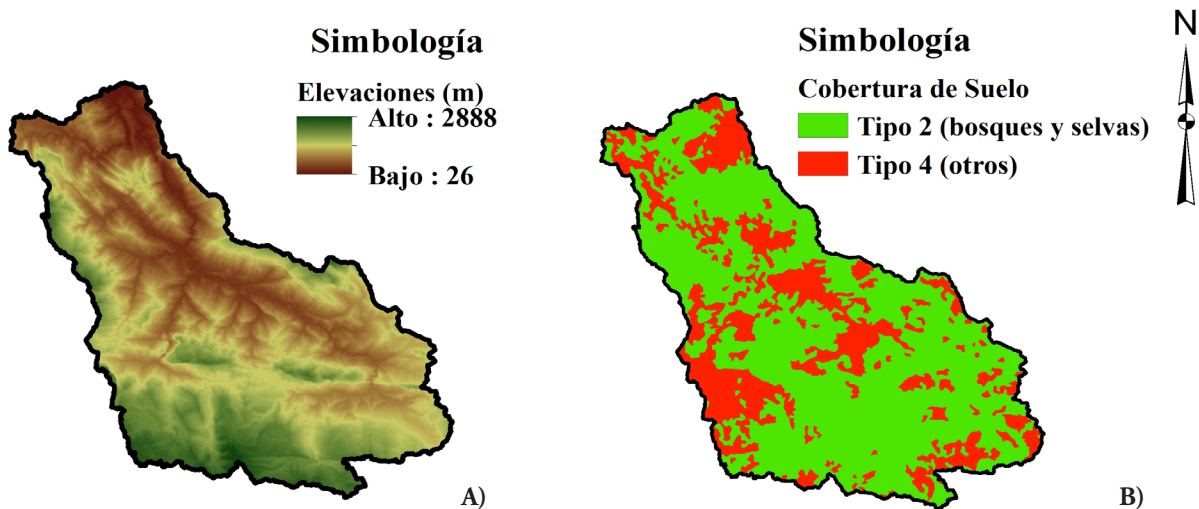


Figura 2. A) Modelo Digital de Elevación; B) Cobertura de suelo utilizada en CEQUEAU.
Figure 2. A) Digital Elevation Model; B) Soil cover used in CEQUEAU.

Modelo hidrológico

El modelo CEQUEAU se seleccionó para simular el proceso lluvia-escorrentamiento de la CTpj, para un paso de tiempo diario del periodo de 1965 a 1999. CEQUEAU se desarrolló en el Instituto Nacional de la Investigación Científica-Agua (INRS-EAU, ahora INRS-ETE) de la Universidad de Quebec, Canadá (Morin y Paquet 1995). CEQUEAU forma parte de los modelos hidrológicos evaluados por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en cuencas del mundo (Bâ *et al.*, 2001, Bâ *et al.*, 2013; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017).

CEQUEAU es un modelo hidrológico determinista distribuido que toma en cuenta las características físicas de la cuenca y sus variaciones en el espacio. Esta operación es posible por medio de una subdivisión de la cuenca en dos discretizaciones. En la primera discretización la cuenca se divide en una malla de cuadros, y cada elemento se denomina cuadro entero. La segunda discretización subdivide los cuadros enteros en cuadros parciales en función de los parteaguas internos de la cuenca.

CEQUEAU utiliza dos funciones para el movimiento del agua en la cuenca: función de producción y transferencia (Figura 3). La función de producción modela el movimiento del flujo vertical del agua (Figura 3A), por tanto, está orientada para estimar el volumen de agua disponible que se transferirá. El modelo representa el suelo con tres almacenes o embalses interconectados (lagos y ciénegas, suelo y acuífero). Relaciones matemáticas se usan para simular los componentes del balance hidrológico en

evaluated by the World Meteorological Organization (WMO) in watersheds of the world (Bâ *et al.*, 2001, Bâ *et al.*, 2013; Guerra-Cobián *et al.*, 2013; Ouellet-Proulx *et al.*, 2017).

CEQUEAU is a distributed deterministic hydrological model that considers the physical characteristics of a basin, and their spatial variations over it. This operation is possible by means of a subdivision of the basin in two discrete categorizations. In the first discretization the basin is divided into a grid of squares, and each element is denominated whole square. The second discretization subdivides the whole squares into partial squares as a function of the internal watersheds of the basin.

CEQUEAU utilizes two functions for the movement of water in the basin: function of production and transference (Figure 3). The production function models the movement of the vertical flow of the water (Figure 3A). Therefore, it is oriented to estimate the available volume of water that will be transferred. The model represents the soil with three interconnected reservoirs or deposits (lakes, and wetlands, soil and aquifer). Mathematical relationships are used to simulate the components of the hydrological balance in each whole square for each temporal step. The evapotranspiration is calculated with the modified formula of Thornthwaite, equation 1 (Morin and Paquet, 2007).

$$ETHORN = \frac{10}{30.4} \times 1.62 \left(\frac{10 \times TJE}{XIT} \right)^{xM} \tag{1}$$

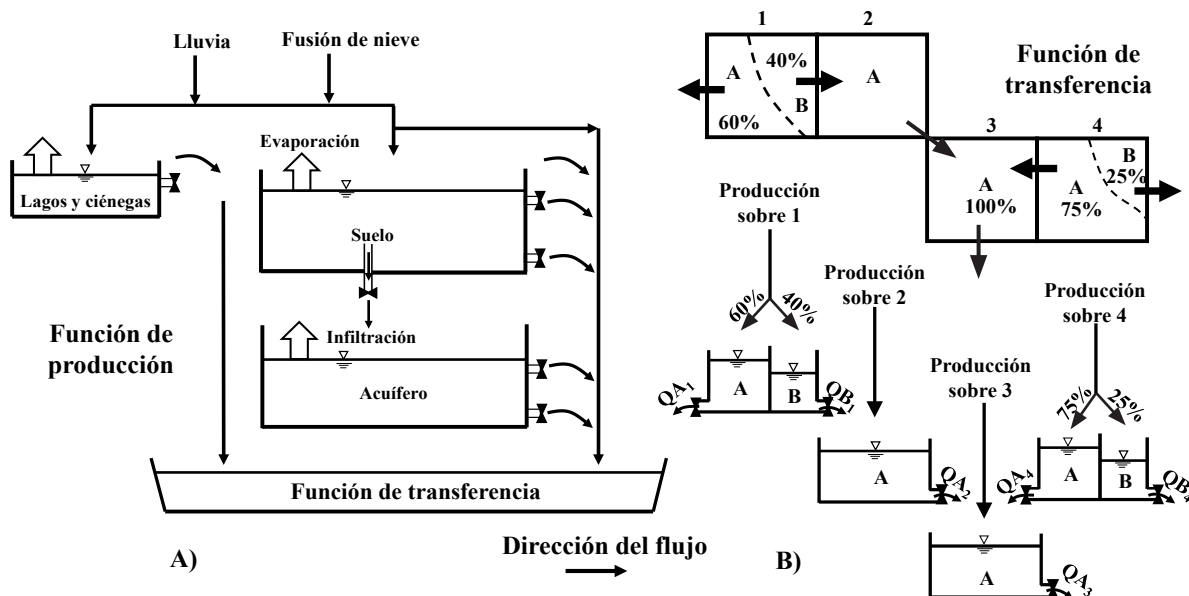


Figura 3. Módulos modelo CEQUEAU: A) función de producción; B) función de transferencia.
 Figure 3. CEQUEAU model modules: A) production function; B) transference function.

cada cuadro entero para cada paso temporal. La evapotranspiración se calcula con la fórmula modificada de Thornthwaite, ecuación 1 (Morin y Paquet, 2007).

$$ETHORN = \frac{10}{30.4} \times 1.62 \left(\frac{10 \times TJE}{XIT} \right)^{XAA} \quad (1)$$

donde *ETHORN* = evapotranspiración diaria (mm), *TJE* = temperatura media diaria (°C), *XAA* = exponente de la fórmula de Thornthwaite, *XIT* = valor del índice de Thornthwaite.

La infiltración hacia el recipiente acuífero (*NAPPE*) se estima con las ecuaciones 2 y 3.

$$XINF = TOINF \times \max(0, HS - HINF) \quad (2)$$

$$XINF = \min(XINFMA, XINF) \text{ ARR27} \quad (3)$$

donde *XINF* = lámina de agua infiltrada (mm) del recipiente suelo (*SOL*) al recipiente acuífero (*NAPPE*), *HS* = nivel de agua en *SOL* (mm), *HINF* = umbral del nivel de infiltración del *SOL* hacia el *NAPPE* (mm), *TONIF* = coeficiente de infiltración en el *NAPPE*, *XINFMA* = infiltración máxima al día (mm), *ARR27* = coeficiente de ponderación calculado con los datos fisiográficos de cada cuadro entero, este varía de 0.8 (suelo desnudo) a 1 (suelo totalmente cubierto por bosque).

El escurrimiento superficial ocurre cuando la lámina de agua disponible en el suelo (*HS*) es superior a la altura del recipiente (*HSOL*), se calcula con la ecuación 4.

$$RUISS = HS - HSOL \quad (4)$$

donde *RUISS* = escurrimiento superficial (mm), *HS* = lámina de agua disponible en el suelo (mm), *HSOL* = altura del recipiente suelo (mm).

La función de transferencia analiza la transferencia del flujo en la red de drenaje hasta la salida de la cuenca y requiere el uso de cuadros parciales (Figura 3B). Los procesos incluidos en la función de transferencia tienen en cuenta la influencia de lagos, ciénegas, presas y derivaciones (Morin y Paquet, 2007).

El modelo CEQUEAU requiere cuatro archivos y una base de datos hidrometeorológica para realizar las simulaciones hidrológicas. Esta información se integra a CEQUEAU en archivos en formato texto (Morin y Paquet, 2007).

CEQUEAU usa cuatro módulos para realizar una simulación de caudales: un módulo externo (módulo hidrogeomático) y tres módulos internos en el modelo (Figura 4). El módulo hidrogeomático se encuentra desarrollado en el SIG Idrisi. El módulo

where *ETHORN* = daily evapotranspiration (mm), *TJE* = daily average temperature (°C), *XAA* = exponent of the formula of Thornthwaite, *XIT* = value of the Thornthwaite index.

The infiltration toward the recipient aquifer (*NAPPE*) is estimated with equations 2 and 3.

$$XINF = TOINF \times \max(0, HS - HINF) \quad (2)$$

$$XINF = \min(XINFMA, XINF) \text{ ARR27} \quad (3)$$

where *XINF* = infiltrated water table level (mm) from the soil recipient (*SOL*) to the aquifer (*NAPPE*), *HS* = water level in *SOL* (mm), *HINF* = threshold of the level of infiltration of the *SOL* to the *NAPPE* (mm), *TONIF* = coefficient of infiltration in the *NAPPE*, *XINFMA* = maximum infiltration per day (mm), *ARR27* = weighting coefficient calculated with the physiographic data of each whole square; this varies from 0.8 (bare soil) to 1 (soil totally covered by forest).

The surface runoff occurs when the available water level in the soil (*HS*) is greater than the height of the recipient (*HSOL*), and is calculated with equation 4

$$RUISS = HS - HSOL \quad (4)$$

where *RUISS* = surface runoff (mm), *HS* = available water level in the soil (mm), *HSOL* = height of the soil recipient (mm).

The function of transference analyzes water flow as it is transferred in the drainage network to the exit of the basin; and it requires the use of partial squares (Figure 3B). The processes included in the transference function consider the influence of lakes, wetlands, dams and derivations (Morin and Paquet, 2007).

The CEQUEAU model requires four files and a hydrometeorological database to carry out the hydrological simulations. This information is integrated to CEQUEAU in files in text format (Morin and Paquet, 2007).

CEQUEAU uses four modules to perform a simulation of flows: an external module (hydrogeomatic module) and three internal modules in the model (Figure 4). The hydrogeomatic module was developed in the SIG Idrisi. The Idrisi-CEQUEAU module obtains the files in text format required by the model: 1) file of physiographic data (*.PHY), 2) file of watershed data (*.BV), 3) file of hydrometeorological data (*.DHM), and 4) file of model parameters (*.PAH). In the application of this module, the following were used: 1) a MDE of the study zone, 2) a soil cover map, and 3) the location of the hydrometric and meteorological stations. In the Idrisi-CEQUEAU module, the watershed was The internal modules in CEQUEAU are as

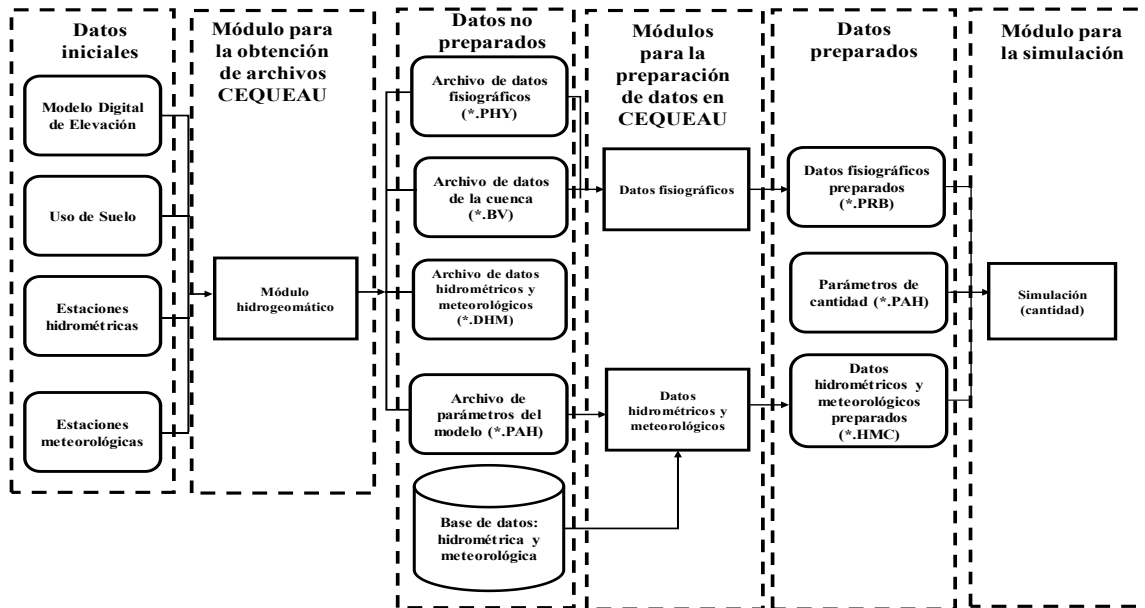


Figura 4. Estructura general de CEQUEAU (Adaptada de Morin y Paquet, 2007).
Figure 4. General structure of CEQUEAU (Adapted from Morin and Paquet, 2007).

Idrisi-CEQUEAU obtiene los archivos en formato texto requeridos por el modelo: 1) archivo de datos fisiográficos (*.PHY), 2) archivo de datos de la cuenca (*.BV), 3) archivo de datos hidrometeorológicos (*.DHM), y 4) archivo de parámetros del modelo (*.PAH). En la aplicación de este módulo se utilizó: 1) un MDE de la zona en estudio, 2) un mapa de cobertura de suelo, y 3) la ubicación de las estaciones hidrométricas y meteorológicas. En el módulo Idrisi-CEQUEAU se discretizó la cuenca con una malla de cuadros de 5 km x 5 km.

Los módulos internos en CEQUEAU son: 1) preparación de datos fisiográficos, b) preparación de datos hidrometeorológicos, y 2) simulación de caudales.

Sitios no aforados

En la investigación se utilizaron dos estaciones hidrométricas reales y cuatros sitios no aforados en la CTpj. Los sitios no aforados se consideran en CEQUEAU como estaciones hidrométricas adicionales o ficticias (Cuadro 1).

Calibración y validación

La calibración es la etapa más importante en la modelación hidrológica y en ella se ajustan los parámetros del modelo para un periodo de tiempo. En la validación, estos parámetros se evalúan para un periodo de tiempo distinto, u otro sitio en la cuenca con

follows: 1) preparation of physiographic data, b) preparation of hydrometeorological data, and 2) flow simulation.

Ungauged sites

In this study two real hydrometric stations were used along with four ungauged sites in the CTpj. The ungauged sites are considered in CEQUEAU as additional or fictitious hydrometric stations (Table 1).

Calibration and validation

Calibration is the most important stage in hydrological modeling. In calibration, the parameters of the model are adjusted by period of time. In validation, these parameters are evaluated for a different time period, or another site in the basin with hydrometric records. The hydrological simulation of the CTpj was carried out with daily mean flows up to the UTPj from 1965 to 1999. The model was calibrated at the UTPj and UOxo for the period from 1965 to 1990 (three-quarters of the hydrometric information). And the model was validated from 1991 to 1999 at UTPj and UOxo. The UOxo is approximately 12 km upstream from the UTPj. Calibration was carried out by trial and error, and then Powell's optimization algorithm was applied, which is integrated in the CEQUEAU model (Morin and Paquet 1995).

Cuadro 1. Ubicación de las estaciones hidrométricas reales y ficticias.
Table 1. Location of the real and fictitious hydrometric stations.

Clave	Estación hidrométrica	Coordenadas UTM		Área de la cuenca (Km ²)	Altura (m)
		X	Y		
30093 [†]	UTpj	523845.07	1931250.00	3216.5	45
30111 [†]	UOxo	526863.23	1922154.49	2903.0	59
30006 [‡]	Ficticia No. 1	536255.61	1902163.30	2752.7	223
30007 [‡]	Ficticia No. 2	532149.16	1881253.84	512.0	674
30008 [‡]	Ficticia No. 3	569147.79	1874025.02	670.2	938
30009 [‡]	Ficticia No. 4	550600.00	1890450.00	1130.8	361

[†] Estación hidrométrica real (clave definida por la CONAGUA); [‡] Estación hidrométrica ficticia. ♦ [†]Real hydrometric station (code defined by CONAGUA); [‡]Fictitious hydrometric station.

registros hidrométricos. La simulación hidrológica de la CTpj se realizó con caudales medios diarios hasta la UTPj de 1965 a 1999. El modelo se calibró en la UTPj y la UOxo para el periodo de 1965 a 1990 (tres cuartas partes de la información hidrométrica). Y el modelo se validó de 1991 a 1999 en la UTPj y UOxo. La UOxo se encuentra aproximadamente a 12 km aguas arriba de la UTPj.

La calibración se realizó por prueba y error, y después se aplicó el algoritmo de optimización de Powell que se encuentra integrado en el modelo CEQUEAU (Morin y Paquet, 1995).

Eficiencia del modelo

La eficiencia del modelo CEQUEAU se evaluó con las estadísticas recomendadas en Moriasi *et al.* (2007) y Moriasi *et al.* (2015), para un paso de tiempo diario. Los tres criterios estadísticos usados son (Cuadro 2): el coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (*NSE*) (Nash y Sutcliffe 1970) (ecuación 5), el porcentaje de sesgo (*PBIAS*) (ecuación 6), y el coeficiente de determinación (*R*²) (ecuación 7).

El dominio matemático del coeficiente *NSE* es de $-\infty$ hasta 1. Un *NSE* de 1 significa un buen ajuste entre los caudales observados y calculados (Moriasi *et al.*, 2007). Un ajuste perfecto quiere decir que la varianza de los errores es cero; ésta es cero cuando la

Model efficiency

The efficiency of the CEQUEAU model was evaluated with the statistics recommended in Moriasi *et al.* (2007) and Moriasi *et al.* (2015), for a daily passage of time. The three statistical criteria used are (Table 2): the Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient of (*NSE*) (Nash and Sutcliffe, 1970) (equation 5), bias percent (*PBIAS*) (equation 6), and the determination coefficient (*R*²) (equation 7).

The mathematical dominion of the coefficient *NSE* is of $-\infty$ to 1. An *NSE* of 1 signifies a good fit between the observed and calculated flows (Moriasi *et al.*, 2007). A perfect fit means that the variance of the errors is zero. And it is zero when the variance of the errors and the observed variance are equal. This means that the model produces estimations of the average of the observations in all of the intervals. The negative values indicate a worse performance of the model (Magaña-Hernández *et al.*, 2013).

Bias percent (*PBIAS*) measures the average tendency of the data calculated to be greater or smaller than the observed data. The optimum value of *PBIAS* is 0.0, in which the values of low magnitude indicate a precise simulation of the model. The positive values indicate a bias of the model toward underestimation, and negative values indicate a bias toward

Cuadro 2. Eficiencia de un modelo hidrológico (Adaptada de Moriasi *et al.*, 2015).
Table 2. Efficiency of a hydrological model (Adapted from Moriasi *et al.*, 2015).

Eficiencia	NSE	PBIAS (%)	R ²
Muy bueno	NSE > 0.80	PBIAS < ±5	R ² > 0.85
Bueno	0.70 < NSE ≤ 0.80	±5 ≤ PBIAS < ±10	0.75 < R ² ≤ 0.85
Satisfactorio	0.50 < NSE ≤ 0.70	10± ≤ PBIAS < ±15	0.60 < R ² ≤ 0.75
No satisfactorio	NSE ≤ 0.50	PBIAS ≥ ±15	R ² ≤ 0.60

varianza de los errores y la observada son iguales. Esto significa que el modelo produce estimaciones del promedio de las observaciones en todos los intervalos. Los valores negativos indican un desempeño peor del modelo (Magaña-Hernández *et al.*, 2013). Porcentaje de sesgo (*PBIAS*) mide la tendencia promedio de los datos calculados a ser mayores o más pequeños que los datos observados. El valor óptimo de *PBIAS* es 0.0, en el cual los valores de magnitud baja indican una simulación precisa del modelo. Los valores positivos indican un sesgo del modelo hacia la subestimación, y valores negativos indican un sesgo hacia la sobreestimación (Moriasi *et al.*, 2007). El R^2 varía de 0.0 a 1 y describe la proporción de la varianza total en los datos observados que puede explicar el modelo. Un valor de cero significa que no hay correlación en absoluto, mientras que un valor de 1 significa que la dispersión de la estimación es igual a la observada (Krause *et al.*, 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs_i}} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

donde Q_{Obs_i} y Q_{Cal_i} = caudales observados, y calculados en el día i ($m^3 \cdot s^{-1}$), \bar{Q}_{Obs} y \bar{Q}_{Cal} = promedio de los caudales observados y calculados en los n días ($m^3 \cdot s^{-1}$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las estadísticas usadas para medir la eficiencia del modelo en la UTpj y la UOxo en la calibración, validación y el periodo de 1965-1999 se compararon (Cuadro 3). En la calibración, de acuerdo con Moriasi *et al.*, 2007 y Moriasi *et al.*, 2015, el modelo fue muy bueno en la UTpj ($NSE = 0.97$ y $R^2 = 0.97$) y UOxo ($NSE = 0.94$ y $R^2 = 0.96$). El *PBIAS* positivo indicó que el modelo da una subestimación ligera de los caudales en la calibración (UTpj = 0.25 y UOxo = 1.04). En la UTpj el caudal medio interanual observado fue $102.8 m^3 \cdot s^{-1}$ y el calculado fue $102.5 m^3 \cdot s^{-1}$ (Cuadro 3A). En la UOxo el caudal medio interanual observado fue $84.0 m^3 \cdot s^{-1}$ y el calculado $83.1 m^3 \cdot s^{-1}$ (Cuadro 3B).

overestimation (Moriasi *et al.*, 2007). The R^2 varies from 0.0 to 1 and describes the proportion of the total variance in the observed data that can explain the model. A value of zero signifies that there is no correlation, whereas a value of 1 signifies that the dispersion of the estimation is equal to that which is observed (Krause *et al.*, 2005).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \quad (5)$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - Q_{Cal_i})}{\sum_{i=1}^n Q_{Obs_i}} \right] \times 100 \quad (6)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})(Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Obs_i} - \bar{Q}_{Obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{Cal_i} - \bar{Q}_{Cal})^2}} \right]^2 \quad (7)$$

where Q_{Obs_i} and Q_{Cal_i} = observed flows, and calculated on day i ($m^3 \cdot s^{-1}$), \bar{Q}_{Obs} and \bar{Q}_{Cal} = average of the observed, and calculated flows in the n days ($m^3 \cdot s^{-1}$).

RESULTS AND DISCUSSION

The statistics used to measure the efficiency of the model in the UTpj and the UOxo, at calibration, validation, and 1965-1999 period, were compared (Table 3). In the calibration, according to Moriasi *et al.*, 2007 and Moriasi *et al.*, 2015, the model was very good in the UTpj ($NSE = 0.97$ and UOxo ($NSE = 0.94$ and $R^2 = 0.96$). The positive *PBIAS* indicated that the model gives a slight underestimation of the flows in the calibration (UTpj = 0.25 and UOxo = 1.04). In the UTpj the observed inter annual average flow was $102.8 m^3 \cdot s^{-1}$ and the calculated flow was $102.5 m^3 \cdot s^{-1}$ (Table 3A). In the UOxo, the observed inter annual average flow was $84.0 m^3 \cdot s^{-1}$ and the calculated flow was $83.1 m^3 \cdot s^{-1}$ (Table 3B).

In the validation, the model was very good in the UTpj ($NSE = 0.89$ and $R^2 = 0.93$) and UOxo ($NSE = 0.89$ and $R^2 = 0.90$). Positive *PBIAS* at UTpj indicated that the model underestimates water flows ($PBIAS = 11.19$) from November to December. Furthermore, the negative *PBIAS* in the UOxo indicates an overestimation in the flows ($PBIAS = -4.21$).

Observed and calculated hydrographs were obtained in the calibration, validation and in the

Cuadro 3. Calibración y validación del modelo.**Table 3. Calibration and validation of the model.**

Periodo	A) Estación hidrométrica Tapijulapa (UTpj, 30093)						
	[†] Q _{Obs} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[§] L _{Obs} (mm)	[¶] L _{Cal} (mm)	[°] NSE	^{††} PBIAS	^{***} R ²
Calibración (1965-1990)	102.8	102.5	1018	1016	0.97	0.25	0.97
Validación (1991-1999)	120.6	107.1	1195	1061	0.89	11.19	0.93
Simulación (1965-1999)	107.3	103.7	1063	1028	0.96	3.36	0.97
Periodo	B) Estación hidrométrica Oxolotán (UOxo, 30111)						
	[†] Q _{Obs} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[§] L _{Obs} (mm)	[¶] L _{Cal} (mm)	[°] NSE	^{††} PBIAS	^{***} R ²
Calibración (1965-1990)	84.0	83.1	917	907	0.94	1.04	0.96
Validación (1991-1999)	85.6	89.2	934	973	0.89	-4.21	0.90
Simulación (1965-1999)	84.4	84.7	921	924	0.95	-0.33	0.96

[†]Caudal medio interanual observado; [‡]Caudal medio interanual calculado; [§]Lámina interanual observada; [¶]Lámina interanual calculada; [°]Eficiencia de Nash-Sutcliffe; ^{††}Porcentaje de sesgo; ^{***}Coefficiente de determinación. ♦ [†]Observed inter annual average flow; [‡]Calculated inter annual average flow; [§]Observed inter annual precipitation; [¶]Calculated inter annual precipitation; [°]Nash-Sutcliffe efficiency; ^{††}Bias percent; ^{***}Coefficient of determination.

En la validación el modelo fue muy bueno en la UTpj ($NSE = 0.89$ y $R^2 = 0.93$) y UOxo ($NSE = 0.89$ y $R^2 = 0.90$). El *PBIAS* positivo en la UTpj indicó que el modelo subestima los caudales ($PBIAS = 11.19$) de noviembre a diciembre. Además, el *PBIAS* negativo en la UOxo indica una sobreestimación en los caudales ($PBIAS = -4.21$).

Hidrogramas observados y calculados se obtuvieron en la calibración, validación y en el periodo de simulación. Los hidrogramas calculados se ajustan de forma adecuada a los observados en la UTpj y UOxo (Figura 5). Además, el modelo reproduce de manera correcta las temporadas de estiaje (abril y mayo) y de avenidas (septiembre y octubre).

También se presentan los diagramas de dispersión de los caudales observados contra los calculados (Figura 6) para las etapas, calibración (1965-1990), validación (1991-1999) y el periodo completo de simulación (1965-1999). Estos diagramas de dispersión muestran con claridad el desempeño del modelo hidrológico CEQUEAU durante la calibración, validación y el periodo completo de simulación. En la UTpj (Figura A, B y C) y UOxo los datos se encontraron más agrupados a lo largo de la línea de 45°, en la calibración y el periodo completo de simulación (1965-1999).

La aplicación del modelo CEQUEAU en la CTpj permitió conocer los caudales en cuatro sitios no aforados (Cuadro 4). Los caudales medios interanuales

period of simulation. The calculated hydrographs are fitted adequately to those observed in the UTpj and UOxo (Figure 5). Furthermore, the model correctly reproduces the dry season (April and May), and that of floods (September and October).

We also present dispersion diagrams of the observed flows against the calculated ones (Figure 6) for calibration (1965-1990), validation (1991-1999), and the complete simulation period (1965-1999). These dispersal diagrams clearly show the performance of the CEQUEAU hydrological model during the calibration, validation, and the complete period of simulation. In the UTpj (Figure A, B and C) and UOxo, the data were found more grouped along the line of 45°, in the calibration and the complete period of simulation (1965-1999).

The application of the CEQUEAU model in the CTpj made it possible to know the flows in four ungauged sites (Table 4). The inter annual average flows varied from 26.36 m³·s⁻¹ to 76.18 m³·s⁻¹ in the period from 1965 to 1999. The volumes of interannual runoffs in the ungauged sites go from 335 to 2405 Mm³ (1965 to 1999). In the hydrographs estimated for the ungauged sites it was observed that the estimated behavior of the flows is similar to the actual records of stations (Figure 7).

The CEQUEAU model is used in Mexico for the simulation of daily flows in different climatic regions, but CEQUEAU is not used in the country

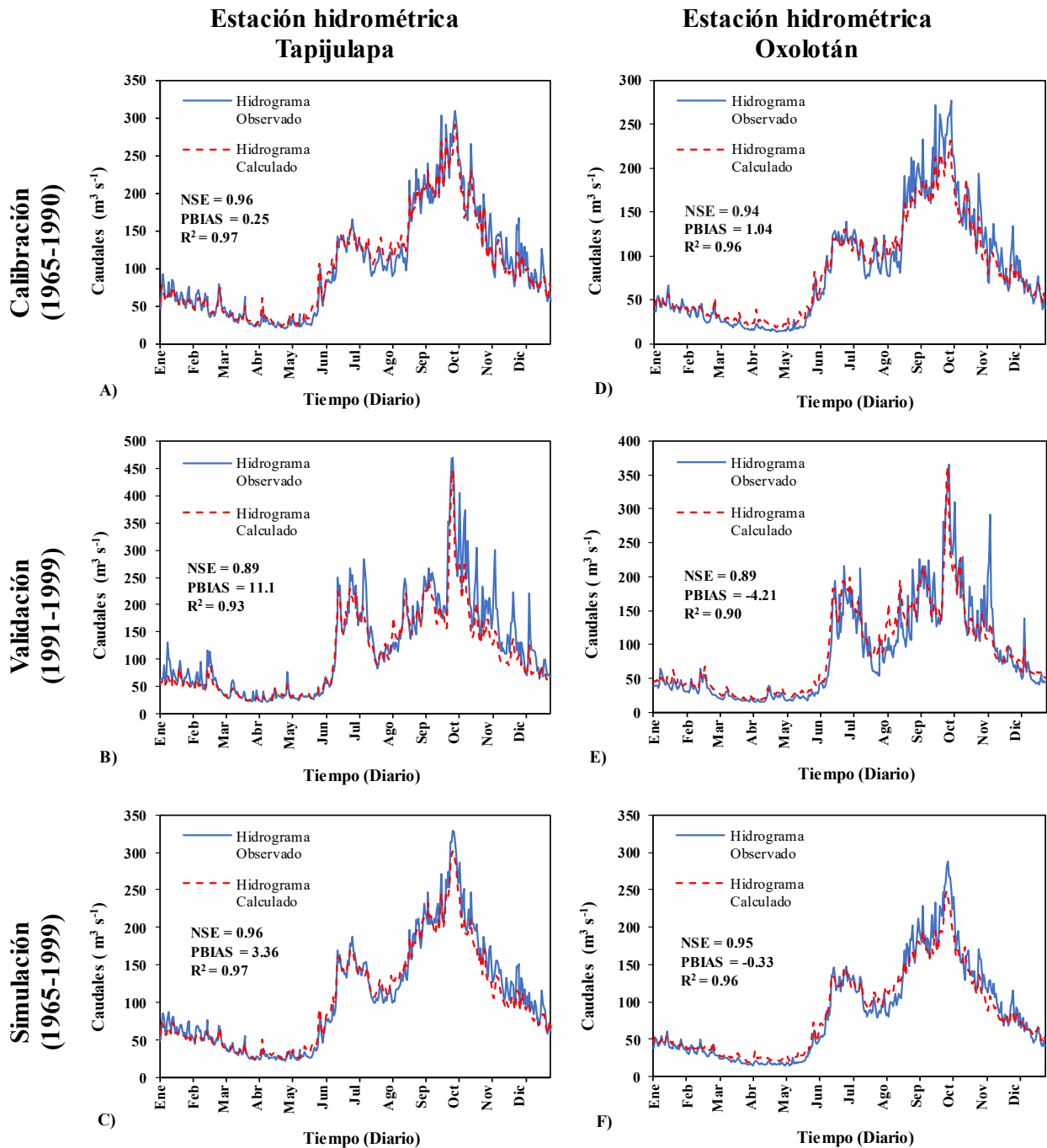


Figura 5. Resultados en las simulaciones: calibración (1965-1990), validación (1991-1999) y periodo completo de simulación (1965-1999).

Figure 5. Results of the model at: calibration (1965-1990), validation (1991-1999) and complete period simulation (1965-1999).

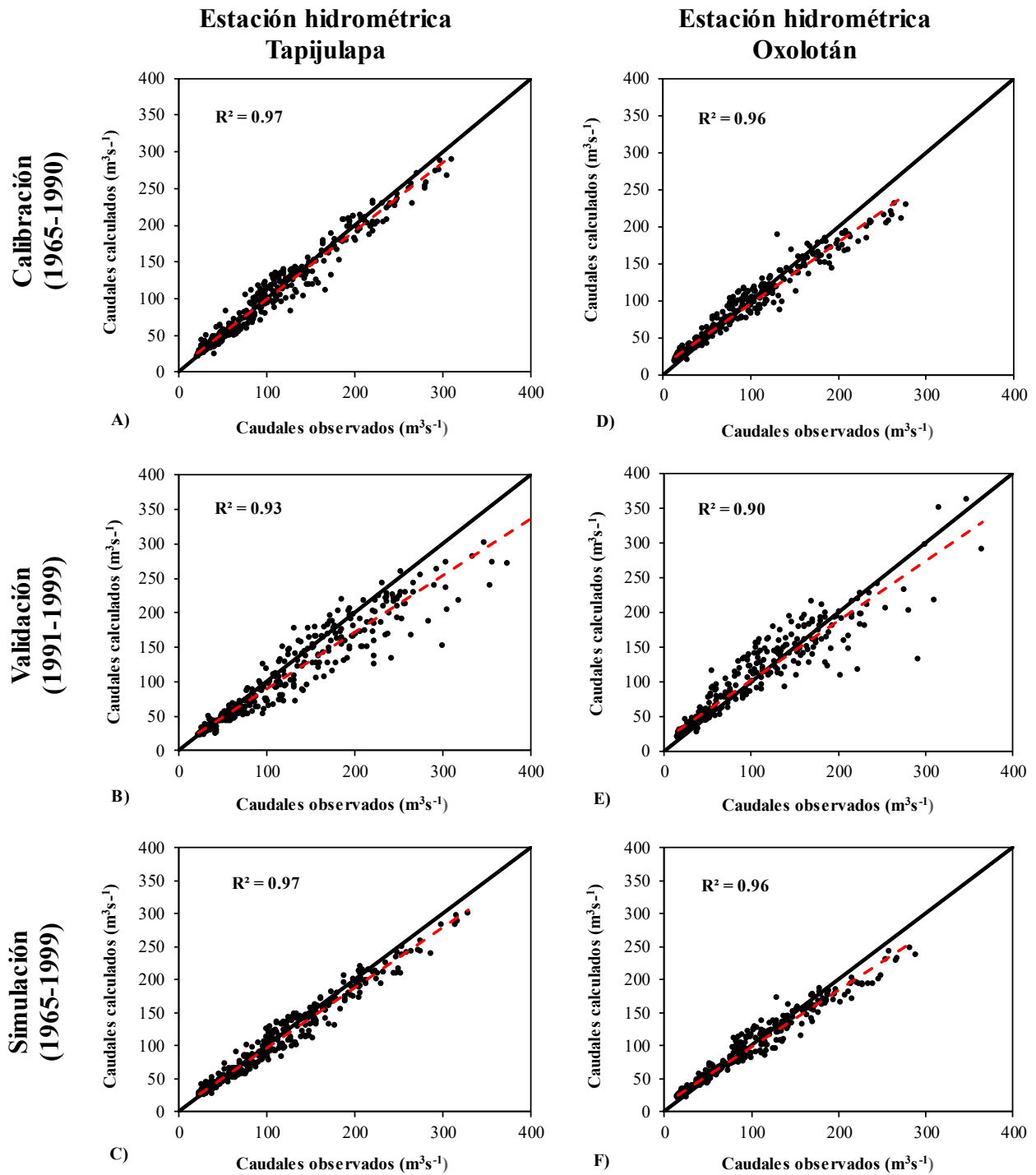


Figura 6. Diagramas de dispersión que muestran la correlación entre los caudales observados y calculados.
 Figure 6. Dispersion diagrams that show the correlation between the observed and calculated flows.

Cuadro 4. Calibración y validación del modelo.
Table 4. Calibration and validation of the model.

Clave	Estación hidrométrica	Área de la cuenca (km ²)	[†] Q _{Cal} (m ³ ·s ⁻¹)	[‡] L _{Cal} (mm)	Volumen interanual (Mm ³)
30006	Ficticia No. 1	2752.7	76.18	895	2402
30007	Ficticia No. 2	512.0	10.63	655	335
30008	Ficticia No. 3	670.2	14.75	671	465
30009	Ficticia No. 4	1130.8	26.36	741	831

[†]Caudales observados; [‡]Caudales calculados. ❖ [†]Observed flows; [‡]Calculated flows.

variaron de 26.36 m³·s⁻¹ a 76.18 m³·s⁻¹ en el periodo de 1965 a 1999. Los volúmenes de escurrimientos interanuales en los sitios no aforados van de 335 a 2402 Mm³ (1965 a 1999). En los hidrogramas estimados para los sitios no aforados se observó que el comportamiento de los caudales es similar a los registros de las estaciones reales (Figura 7).

for the estimation of flows in ungauged watersheds. In the following section, the results of this study will be compared with research carried out in Mexico. Bâ *et al.* (2001) analyzed the hydrological behavior of the Amacuzac and San Jerónimo rivers (state of Mexico), and the value of *NSE* in the calibration was 0.977 (Amacuzac River) and in the validation 0.71

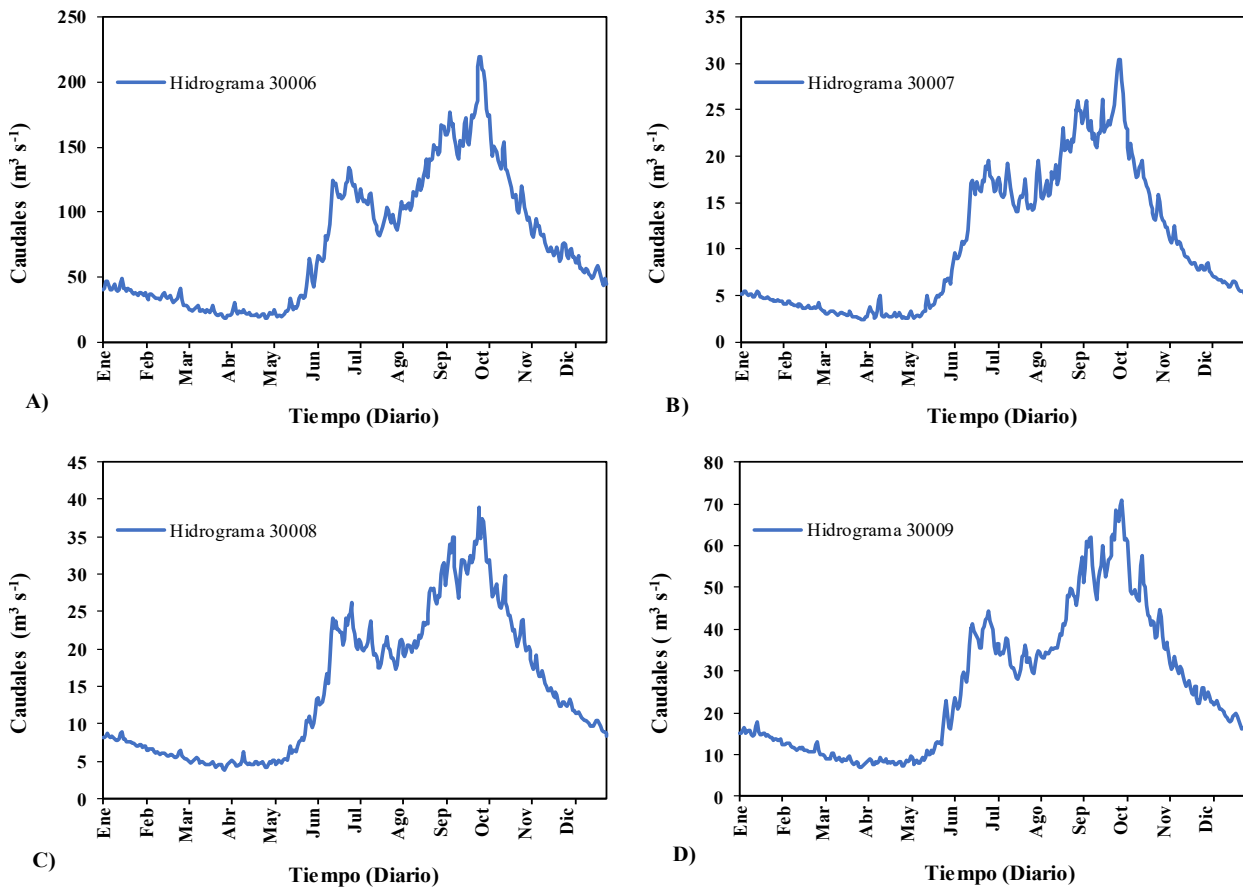


Figura 7. Hidrogramas calculados en sitios no aforados.
Figure 7. Hydrographs calculated in ungauged sites.

El modelo CEQUEAU se usa en México para la simulación de caudales diarios en diferentes regiones climáticas, pero CEQUEAU no se utiliza en el país para la estimación de caudales en cuencas no aforadas. Por último, los resultados de este estudio se compararon con investigaciones realizadas en México. Bà *et al.* (2001) analizaron el comportamiento hidrológico de los ríos Amacuzac y San Jerónimo (estado de México), y el valor de *NSE* en la calibración fue 0.977 (río Amacuzac) y en la validación 0.71 a 0.85 (río San Jerónimo). Además, Vilchis-Mata *et al.* (2015) simularon los caudales diarios del río Amacuzac con precipitación estimada con sensores hidrometeorológicos y los valores de *NSE* en la calibración variaron de 0.60 a 0.85.

Nuestra investigación es similar a un estudio realizado en el río La Sierra (Díaz-Mercado *et al.* (2015) en los estados de Chiapas y Tabasco. El río La Sierra tiene varios nombres desde su origen en Chiapas y, al pasar por el municipio de Tacotalpa (Tabasco), toma el nombre de río Tacotalpa. Además, Díaz-Mercado *et al.* (2015) simularon los caudales diarios del río La Sierra hasta la estación hidrométrica Pueblo Nuevo (30016) en Tabasco, y el *NSE* fue 0.88 en la calibración del modelo.

CONCLUSIONES

En el estudio se utilizó el modelo distribuido CEQUEAU para estimar caudales en sitios no aforados de la cuenca del río Tacotalpa. El diseño de un módulo hidrogeomático particularizado para la zona en Idrisi permitió la extracción de la información requerida por el modelo hidrológico.

El modelo hidrológico CEQUEAU se calibró hasta la estación hidrométrica Tapijulapa (30093), mientras la estación hidrométrica Oxolotán (30111) se utilizó para calibrar y validar el modelo. CEQUEAU efectuó simulaciones muy buenas y reflejó los escurrimientos en la cuenca. La modelación hidrológica de la cuenca del río Tacotalpa permitió conocer y reproducir la distribución de los caudales medios interanuales en cuatro puntos no aforados en la cuenca.

Debido a la precisión de sus resultados, el modelo se puede aplicar para estimar los caudales en otros sitios de la cuenca no considerados en esta investigación. El conocimiento de la disponibilidad de los volúmenes en varios puntos del río tiene gran

to 0.85 (San Jerónimo River). In addition, Vilchis-Mata *et al.* (2015) simulated the daily flows of the Amacuzac River with precipitation estimated with hydrometeorological sensors and the values of *NSE* in the calibration varied from 0.60 to 0.85.

Our research can be compared with a study made in the La Sierra River (Díaz-Mercado *et al.* (2015) in the states of Chiapas and Tabasco. La Sierra River has various names after its origin in Chiapas, and as it passes through the municipality of Tacotalpa (Tabasco), it takes the name of Tacotalpa River. Additionally, Díaz-Mercado *et al.* (2015) simulated the daily flows of La Sierra River as far as the hydrometric station Pueblo Nuevo (30016) in Tabasco, and the *NSE* was 0.88 in the calibration of the model.

CONCLUSIONS

This study used the CEQUEAU distributed model to estimate flows in ungauged sites of the Tacotalpa River basin. The design of a particular to the site hydro-geomatic module on Idrisi allowed the extraction of the information required for the hydrological model.

The CEQUEAU hydrological model was calibrated up to Tapijulapa Hydrometric Station (30093), while Oxolotán station (30111) was used to calibrate and validate the model. CEQUEAU made very good simulations, depicting flows in the watershed. The hydrological modelling in Tacotalpa River basin made it possible to know and reproduce the distribution of the inter annual average flows at four ungauged points of the basin.

Due to the accuracy of results, this model can be applied to estimate flows in other sites of the basin not considered in this research. The knowledge of volumes availability in several points of the river is very important, as it can help the planning and administration management of the hydric resources in the basin.

—End of the English version—

-----*

importancia, y puede ayudar en la planeación y administración de los recursos hídricos en la cuenca.

LITERATURA CITADA

- Ang, R., and C. Oeurng. 2018. Simulating streamflow in an ungauged catchment of Tonlesap Lake Basin in Cambodia using Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model. *Water Sci.* 2: 89-101.
- Bâ, K. M., C. Díaz-Delgado, y V. Rodríguez-Osorio. 2001. Simulación de caudales de los ríos Amacuzac y San Jerónimo en el estado de México, México. *Ing. Hid. Méx.* 16: 117-126.
- Bâ, K. M., C. Díaz-Delgado, E. Quentin, V. H. Guerra-Cobián, J. I. Ojeda-Chihuahua, C. Alin-Andrei, y R. Franco-Plata. 2013. Modelado hidrológico de grandes cuencas: caso de estudio del río Senegal, África Occidental. *Tecnol. Cienc. Agua* 4: 129-136.
- Bâ, K. M., V. Diaz, M.A. Gómez-Albores, C., Díaz-Delgado, N. Nájera-Mota, O. Seidou, and F. Ortiz. 2018a. Spatially distributed hydrological modelling of a Western Africa basin. *EPiC Ser. Eng.* 3: 343-350.
- Bâ, K. M., L. Balcázar, V. Díaz, F. Ortiz, M. A. Gómez-Albores, and C. Díaz-Delgado. 2018b. Hydrological evaluation of PERSIANN-CDR rainfall over Upper Senegal River and Bani River Basins. *Remote Sens.* 10: 1-19.
- Boisvert, J., N. El-Jabi, A. St-Hilaire, and S. E. El Adlouni. 2016. Parameter estimation of a distributed hydrological model using a genetic algorithm. *Open J. Modern Hydrol.* 6: 151-167.
- Chiew, F. H. S., H. Zheng, and N. J. Potter. 2018. Rainfall-runoff modelling considerations to predict streamflow characteristics in ungauged catchments and under climate change. *Water-sui.* 10: 1-19.
- Devi, G. K., B. P. Ganasri, and G. S. Dwarakish. 2015. A review on hydrological models. *Aquat. Pr.* 4: 1001-1007.
- Díaz-Mercado, V., K. M. Bâ, E. Quentin, F. H. Ortiz Madrid, and L. Gama. 2015. Hydrological model to simulate daily flow in a basin with the help of a GIS. *Open J. Mod. Hydrol.* 5: 58-67.
- Dugdale, S. J., A. St-Hilaire, and R. A., Curry. 2017. Hydrological and water temperature modelling for dam decommissioning and climate change studies. *European Water.* 59: 53-59.
- Espinoza-López, J. A., L. A. Ibañez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, y J. M. Galeana-Pizaña. 2020. Modelación hidrológica distribuida con imágenes GPM-IMERG en la cuenca del río Huaynamota, Nayarit, México. *Tecnol. Cienc. Agua.* 11: 344-383
- Gao, Z., D. Long, G. Tang, C. Zeng, J. Huang, and Y. Hong. 2017. Assessing the potential of satellite-based precipitation estimates for flood frequency analysis in ungauged or poorly gauged tributaries of China's Yangtze River basin. *J. Hydrol.* 550: 478-496.
- Guerra-Cobián, V. H., K. M. Bâ, E. Quentin-Joret, C. Díaz-Delgado, y C. Alin-Andrei. 2011. Empleo de información NEXRAD en el modelado hidrológico para cuencas con pluviometría deficiente. *Tecnol. Cienc. Agua.* 2: 35-48.
- Guerra-Cobián, V. H., K. M. Bâ, C. Díaz-Delgado, y E. Quentin-Joret. 2013. Efecto de la discretización espacial sobre las simulaciones de caudal con el modelo distribuido CEQUEAU. *Tecnol. Cienc. Agua.* 4: 33-53.
- Jarvis, A., H. I. Reuter, A. Nelson, and E. Guevara. 2008. Ho-le-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90 m Database.
- Krause, P., D. Boyle, and F., Bâse. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Adv. Geosci.* 5: 89-97.
- Li, Y., S. Grimaldi, V. R. N. Pauwels, and J. P. Walker. 2018. Hydrologic model calibration using remotely sensed soil moisture and discharge measurements: The impact on predictions at gauged and ungauged locations. *J. Hydrol.* 557: 897-909.
- Loukas, A., and L. Vasiliades. 2014. Streamflow simulation methods for ungauged and poorly gauged watersheds. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14:1641-1661.
- Magaña-Hernández, F., K. M. Bâ, y V. H. Guerra-Cobián. 2013. Estimación del hidrograma de crecientes con modelación determinística y precipitación derivada de radar. *Agrociencia.* 47:739-752.
- Moiz, A., A. Kawasaki, T. Koike, and M. Shrestha. 2018. A systematic decision support tool for robust hydropower site selection in poorly gauged basins. *Appl. Energ.* 224: 309-321.
- Morin, G., and P. Paquet. 1995. Le modèle de simulation que Quantité et de qualité CEQUEAU, guide de l'utilisateur. Versión 2.0 pour Windows. INRS-Eau, Rapport de recherche No. 435:54. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1099/1/R000435.pdf>. (Consulta: enero: 2020).
- Morin, G., and P. Paquet. 2007. Modèle hydrologique CEQUEAU, INRS-ETE, rapport de recherche no R000926, 458 p. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/1098/1/R000926.pdf>. (Consulta: enero 2020).
- Moriassi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, and T. L. Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed Simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.
- Moriassi, D. N., M. W. Gitau, N. Pai, and P. Daggupati. 2015. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 58: 1763-1785.
- Nash, J. E., and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models, part I - A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Ouellet-Proulx, S., O. Chimi, M. Boucher, and A. St-Hilaire. 2017. Assimilation of water temperature and discharge data for ensemble water temperature forecasting. *J. Hydrol.* 554: 342-359.
- Reed, S., J. Schaake, and Z. Zhang. 2007. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. *J. Hydrol.* 337: 402-420.
- Salas-Martínez, R., L. A. Ibañez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, M. R. Martínez-Menes, y D. S. Fernández-Reynoso. 2014. Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia* 48: 1-15.
- Swain, J. B., and K. C. Patra. 2017. Streamflow estimation in ungauged catchments using regionalization techniques. *J. Hydrol.* 554: 420-433.
- Tsegaw, A. T., K. Alfredsen, T. Skaugen, and T. M. Muthanna. 2019. Predicting hourly flows at ungauged small rural catchments using a parsimonious hydrological model. *J. Hydrol.* 573: 855-871.

- Vargas-Castañeda, G., L. A. Ibáñez-Castillo, R. Arteaga-Ramírez, y G. Arévalo-Galarza. 2018. Kinematic wave hydrologic model of the Turbio River basin, Guanajuato, Mexico. *Ing. Agríc. Biosist.* 10: 33-47.
- Vilchis-Mata, I., K. M. Bâ, R. Franco-Plata, y C. Díaz-Delgado. 2015. Modelación hidrológica con base en estimaciones de precipitación con sensores hidrometeorológicos. *Tecnol. Cienc. Agua.* 6: 45-60.
- Xie, X., S. Meng, S. Liang, and Y. Yao. 2014. Improving streamflow predictions at ungauged locations with real-time updating: Application of an EnKF-based state-parameter estimation strategy. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18: 3923-3936.
- Zezelew, D. G., and A. M Melesse. 2018. Applicability of a spatially semi-distributed hydrological model for watershed scale runoff estimation in Northwest Ethiopia. *Water-sui.* 10: 1-16.

ALTERNATIVA PROBABILÍSTICA BAYESIANA PARA UNA ESTIMACIÓN MEJOR DEL COEFICIENTE DE CULTIVO BASADO EN ÍNDICES DE VEGETACIÓN

A BAYESIAN PROBABILISTIC ALTERNATIVE FOR A BETTER ESTIMATION OF THE CROP COEFFICIENT BASED ON VEGETATION INDEXES

Víctor Manuel **Salas-Aguilar**^{*}, María Elena **Torres-Olave**, Hugo Luis **Rojas-Villalobos**,
Luis Carlos **Alatorre-Cejudo**, Luis Carlos **Bravo-Peña**

Geoinformática, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. DMC Cuauhtémoc. Carretera Cuauhtémoc-Anáhuac Km 3.5, Ejido Cuauhtémoc. 31600 Ciudad Cuauhtémoc, Chihuahua. (victor.salas@uacj.mx).

RESUMEN

La estimación robusta y operativa de los requerimientos hídricos en los cultivos, es una premisa que tienen que cumplir los especialistas en el manejo del agua. El objetivo de este estudio fue implementar el enfoque bayesiano (EB) para estimar el coeficiente de cultivo (K_c) a partir del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y comparar con los enfoques frecuentistas, ecuaciones generales y específicas para un cultivo. El modelo bayesiano se desarrolló con base en distribuciones de probabilidad de parámetros (a y b) *a priori*, recopilados de 18 investigaciones, que estimaron la relación lineal (K_c -NDVI). En una primera etapa se compararon los enfoques en siete tamaños de muestra (TM) (5, 10, 30, 60, 90, 120 y 150), en ellas se realizaron 1000 repeticiones sin remplazo. Para validar el ajuste de los enfoques en cada TM se utilizaron 156 datos experimentales de K_c -NDVI. En la segunda etapa se evaluó el EB respecto a ecuaciones ajustadas a cultivos específicos, se añadió el primer y segundo cuartil de los datos para hacer la validación. Los resultados mostraron en primera instancia que el EB superó en todos los TM a los métodos frecuentistas y ecuaciones generales. El EB demostró obtener incertidumbres bajas con solo cinco TM, a diferencia de los otros métodos que necesitaron más de 30 registros para obtener resultados similares. La comparación entre EB y ecuaciones específicas corroboró que cinco datos aleatorios recopilados en el primer cuartil de los registros fueron suficientes para obtener incertidumbres bajas. La metodología propuesta es operativa y los datos de K_c se pueden estimar desde las primeras fases fenológicas con certidumbre alta y con pocos datos del NDVI.

ABSTRACT

The robust and operative estimation of water requirements in crops is a premise that water management specialists must fulfill. The aim of this study was to implement the Bayesian approach (EB) to estimate the crop coefficient (K_c) from the normalized difference vegetation index (NDVI), and to compare them to the frequentist approaches, general and specific equations for a crop. The Bayesian model was developed based on probability distributions of parameters (a and b) *a priori*, gathered from 18 studies, which estimated the linear relation (K_c -NDVI). In the first stage, the approaches were compared in seven sample sizes (TM) (5, 10, 30, 60, 90, 120 and 150), in which 1000 repetitions were carried out without replacements. In order to validate the adjustments of each TM, a base of 156 experimental data from K_c -NDVI were used. In the second stage, the EB was evaluated regarding equations adjusted to specific crops, and the first and second quartiles of the data were added to perform validation. Results first showed that the EB surpassed the frequentist methods and general equations in all TM. EB obtained low uncertainties with only five TM, unlike the other methods, which needed more than 30 records to obtain similar results. The comparison between EB and specific equations corroborated that five random data gathered in the first quartile were enough to obtain low uncertainties. This proposed methodology is operative and the K_c data can be estimated from the first phenological stages with a high certainty and few NDVI data.

Key words: probabilistic modeling, normalized difference vegetation index NDVI, water optimization in crops, crop coefficient, remote sensors.

^{*} Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.
Recibido: agosto, 2020. Aprobado: febrero, 2021.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* **55**: 117-131. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2390>

Palabras clave: modelación probabilística, índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI, optimización de agua en cultivos, coeficiente de cultivo, sensores remotos.

INTRODUCCIÓN

La agricultura es la actividad humana que usa más agua en el mundo, y la demanda actual de agua para uso agrícola en el mundo es insostenible. En México este sector usa el 77% del agua disponible. El caso es crítico en zonas agrícolas abastecidas por fuentes subterráneas, en donde la extracción de las aguas supera la recarga, lo que ha propiciado la sobreexplotación de 105 acuíferos, en su mayoría destinados para la agricultura (CONAGUA, 2018). La optimización del uso de agua de riego es imperiosa, por ello es necesario conocer con detalle la demanda hídrica de los cultivos (Hunsaker *et al.* 2005). Para estimar esta demanda, se requiere cuantificar la evapotranspiración real (ETa). Una manera de calcular la ETa es a partir de la metodología FAO-56, cuyo planteamiento general supone que la ETa está en función de la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ETr) y un coeficiente de cultivo (Kc) (Calera *et al.* 2017).

La ETr se calcula con información de estaciones agrometeorológicas en condiciones de campo y Kc se calibra por medio de la razón entre ETa y ETr (Allen *et al.*, 2011). Sin embargo, la estimación de Kc en campo resulta costosa porque es necesaria una instrumentación especializada y puntual (torres de covarianza de torbellinos o lisímetros de pesada) (Pôças *et al.*, 2020), por lo cual es necesario recurrir a métodos operativos para mapear esta variable en áreas grandes (Palacios *et al.*, 2011).

La estimación de Kc se popularizó con el uso de sensores remotos, en particular por su relación con los índices de vegetación (IV) (Calera *et al.*, 2017). La modelación de Kc en función de IV es posible debido a las correlaciones altas entre estas variables y las correspondientes al desarrollo fenológico del cultivo y la reflectancia espectral (Rozenstein *et al.*, 2018).

Este enfoque simplifica la metodología de estimar Kc, porque no requiere del procesamiento de las bandas termales de un satélite y produce resultados similares a otras metodologías como el sistema de balance de energía multiescala en la superficie para el monitoreo operacional de la evapotranspiración superficial (en inglés, MSSEBS) (Colin *et al.*, 2006) y el método

INTRODUCTION

Agriculture is the human activity that uses the most water in the world, and the current demand for water for agricultural use is not sustainable. In Mexico, this sector uses 77% of the available water. The case is critical in agricultural areas supplied by underground water sources, where water extraction surpasses recharges, which has led to the overuse of 105 aquifers, destined mostly for agriculture (CONAGUA, 2018).

The optimization of the use of irrigation water is a pressing issue, why it is crucial to know the water demand of crops in detail (Hunsaker *et al.* 2005). In order to estimate this demand, it is necessary to quantify real evapotranspiration (ETa). One way to do this is using methodology FAO-56, the general approach of which supposes that ETa is based on the evapotranspiration of a reference crop (ETr) and a crop coefficient (Kc) (Calera *et al.* 2017).

ETr is estimated using information from agri-weather stations in field conditions and Kc is calibrated using the ratio between ETa and ETr (Allen *et al.*, 2011). However, estimating the Kc on the field is costly, since it requires a specialized and particular set of instruments (covariance flux towers or weighing lysimeters) (Pôças *et al.*, 2020). Therefore, resorting to operative methods becomes necessary to map this variable in large areas (Palacios *et al.*, 2011).

Kc estimation became popular with the use of remote sensors, particularly due to its relation with vegetation indices (IV) (Calera *et al.*, 2017). Modelling Kc based on IV is possible due to the high correlations between these variables, and those of crop phenological development, and spectral reflectance (Rozenstein *et al.*, 2018).

This approach simplifies the method to estimate Kc, since it does not require satellite thermal bands to be processed, and it produces similar results to other methodologies, such as the multiscale surface energy balancing system (MSSEBS) on the surface for the operational monitoring of surface evapotranspiration (Colin *et al.*, 2006), and the satellite-based energy balance method for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC™) (Allen *et al.*, 2011).

The normalized difference vegetation index (NDVI) and its variants are used to estimate the

de balance de energía con base en satélites para medir la evapotranspiración con calibración internalizada (en inglés, METRICTM) (Allen *et al.*, 2011).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (en inglés, NDVI) y sus variantes se utilizan para estimar el valor de Kc en forma espacialmente explícita, y con este procedimiento es posible estimar la ETa del cultivo de manera operativa (Lei y Yang, 2014). Por esta razón, Montgomery *et al.* (2015) y Toureiro *et al.* (2017) propusieron modelos de Kc-IV para cultivos distintos, o el uso de esta metodología para estimar el consumo hídrico de los cultivos en otras regiones del mundo (Kamble *et al.*, 2013).

Los modelos se basan en una ecuación lineal empírica para cada cultivo; sin embargo, la limitante de usar ecuaciones generadas en condiciones geográficas y fisiográficas diferentes es que se producen variaciones grandes en sus parámetros (Calera *et al.* 2017). El uso de ecuaciones empíricas generadas en otras regiones puede causar una sobrestimación de los requerimientos hídricos de los cultivos y rompe el objetivo deseable de estas aplicaciones que es la optimización del agua aplicada para riego (Odi-Lara *et al.*, 2016).

El enfoque bayesiano (EB) tomó auge en las dos décadas recientes para solventar el problema de usar ecuaciones generales (EG) o ajustes por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) en la estimación de variables ambientales (Weiskittel *et al.*, 2015). Su ventaja radica en que incorpora conocimiento *a priori* acerca de los datos, el cual las EG y ajustes de MCO ignoran por completo (Zhang *et al.*, 2013). Zapata-Cuartas *et al.* (2012) utilizaron EB con registros *a priori* de ajustes de parámetros para estimar biomasa en diferentes sitios del mundo, y mostraron que la incertidumbre en la estimación de biomasa era 300% menor, en comparación con el uso de EG y MCO. Wang *et al.* (2019) mostraron la eficiencia del EB para estimar biomasa a través de Lidar e indicaron que la incorporación de información generada *a priori*, ayudó a disminuir el número de muestras por recopilar.

Respecto al uso del EB en actividades agrícolas, Shirley *et al.* (2020) utilizaron esta metodología para estimar la producción de un cultivo a través de variables agroclimáticas y observaron que el enfoque es factible aun cuando existan datos limitados de variables independientes.

El objetivo de este estudio fue implementar el EB para estimar el Kc a partir del NDVI, y comparar

value of Kc in a spatially explicit way. By using this procedure, it is possible to operatively estimate the ETa of the crop (Lei and Yang, 2014). Due to this, Montgomery *et al.* (2015) and Toureiro *et al.* (2017) proposed Kc-IV models for different crops, or the use of this methodology to estimate the water consumption of crops in other areas of the world (Kamble *et al.*, 2013).

The models are based on an empirical linear equation for each crop, although the limitation of using equations based on different weather and physiographic conditions is that large variations are produced in their parameters (Calera *et al.* 2017). The use of empirical equations generated in other regions can cause an overestimation of the water requirements of crops, thus disregarding the desirable aim of these applications, which is optimizing irrigation water (Odi-Lara *et al.*, 2016).

The Bayesian approach (EB) reached new heights in the past two decades to solve the problem of using general equations (EG) or adjustments by ordinary least squares (MCO) to estimate environmental variables (Weiskittel *et al.*, 2015). Its advantage lies in the incorporation of prior knowledge on the data, which EG and MCO adjustments ignore altogether (Zhang *et al.*, 2013). Zapata-Cuartas *et al.* (2012) used EB with previous records of parameter adjustments to estimate biomass in different areas of the world, and showed that the uncertainty in the estimation of biomass was 300% lower, in comparison with the use of EG and MCO. Wang *et al.* (2019) showed the efficiency of EB to estimate the biomass via Lidar; they indicated that incorporating information produced *a priori* helped reducing the number of samples to be gathered.

Regarding the use of EB in agricultural activities, Shirley *et al.* (2020) used this method to estimate the production of a crop using agri-weather variables and they noticed that the approach is feasible, even when data from independent variables are limited.

The objective of this study was to implement EB to estimate the Ks from the NDVI, and to compare them with the frequentist approaches (EG and crop-specific). Our hypothesis was that the use of specific equations for a crop and a particular area produces high uncertainty when applied at places other than those in which they were originally produced. In addition, the information of the linear adjustments between Kc-IV provided by other research will

con los enfoques frecuentistas (EG y específicas para un cultivo). La hipótesis fue que el uso de ecuaciones específicas para un cultivo y para una zona en particular produce incertidumbre alta al aplicarse en sitios distintos a aquellos donde se generaron. Además, la información de los ajustes lineales entre Kc-IV aportados por otras investigaciones servirá como información *a priori* para ajustar el modelo bayesiano y permitirá reducir las incertidumbres para la estimación de Kc en cultivos diversos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Marco bayesiano en la aplicación de Kc

La relación entre el Kc y el NDVI se puede expresar con la función siguiente:

$$Kc = f(NDVI|\theta) \quad (1)$$

donde θ son parámetros que se pueden obtener por medio de los métodos de mínimos cuadrados (MMC) o por la estimación de máxima verosimilitud (EMV) dentro de los enfoques frecuentistas. El marco bayesiano se expresa respecto a un vector de datos $y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_n)$ y un vector de parámetros $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n)$ de la manera siguiente:

$$p(y, \theta) = p(y | \theta) p(\theta) = p(\theta | y) p(y) \quad (2)$$

donde p representa una función de densidad de probabilidad, los valores de θ pueden obtenerse por medio de mínimos cuadrados u otro medio de ajuste de parámetros. En el contexto de este estudio θ tiene una distribución de probabilidad que puede actualizarse con algunos datos observados (IV):

$$\pi(\theta | Kc) = \frac{\pi(\theta)f(IV|\theta)}{\int \pi(\theta)f(IV|\theta) d\theta} \quad (3)$$

La distribución de probabilidad *a priori* de los parámetros para una ecuación está dada por $\pi(\theta)$; la distribución *a posteriori* que corresponde a las estimaciones nuevas del Kc se representa por $\pi(\theta)|Kc$. El uso del método bayesiano se propone para incorporar información *a priori* de los parámetros reportados en la literatura.

Recopilación de base de datos

La elección de las distribuciones *a priori* de los parámetros es crítica para el desarrollo del método bayesiano. El valor de los

serve as *a priori* information to adjust the Bayesian model and will help reducing uncertainties for the estimation of Kc in different crops.

MATERIALS AND METHODS

Bayesian framework in the application of Kc

The relation between Kc and NDVI can be expressed as follows:

$$Kc = f(NDVI|\theta) \quad (1)$$

where θ are parameters that can be obtained using the least squared methods (LSM) or the maximum likelihood estimate (MLE) within the frequentist approaches. The Bayesian framework is expressed in regard to a vector of data $y = (y_1, y_2, y_3 \dots y_n)$ and a vector of parameters $\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3 \dots \theta_n)$ as follows:

$$p(y, \theta) = p(y | \theta) p(\theta) = p(\theta | y) p(y) \quad (2)$$

where p represents a function of density of probability, and the values of θ can be obtained using least squared tests or other parameter-adjustment methods. In the context of this study θ has a probability distribution that can be updated with some data observed (IV):

$$\pi(\theta | Kc) = \frac{\pi(\theta)f(IV|\theta)}{\int \pi(\theta)f(IV|\theta) d\theta} \quad (3)$$

The *a priori* distribution of the probability of the parameters for an equation is given by $\pi(\theta)$; the *a posteriori* distribution corresponding to the new estimations of the Kc is represented as $\pi(\theta)|Kc$. The use of the Bayesian method is proposed to incorporate *a priori* information of the parameters reported in the literature.

Database gathering

Choosing the *a priori* distributions of the parameters is critical to develop the Bayesian method. The values of parameters *a* and *b* were gathered from 18 scientific publications related to this topic (Table 1). The values of Kc vs. NDVI by Hunsaker *et al.* (2005) were extracted manually from that research to adjust the values in a linear regression, and to obtain the parameters in Table 1. The remaining values of these parameters were obtained from the adjustments performed by the authors.

For the gathered data sets, a linear model was adjusted to estimate Kc based on the NDVI. The Anderson-Darling test was

parámetros a y b se obtuvieron en 18 publicaciones científicas relacionadas con el tema (Cuadro 1). Los valores de K_c vs. NDVI de Hunsaker *et al.* (2005) se extrajeron en forma manual de esa investigación para ajustar los valores en una regresión lineal y así obtener los parámetros del Cuadro 1. Los valores restantes de estos parámetros se obtuvieron de los ajustes realizados por los autores.

A cada conjunto de datos recopilados se ajustó un modelo lineal para estimar K_c en función del NDVI. La prueba Anderson-Darling se utilizó para comprobar que el valor de ambos parámetros a y b estuvieran distribuidos normalmente. La media y desviación estándar de los parámetros del Cuadro 1 se usaron para generar una distribución de probabilidad normal y usar el modelo bayesiano.

Marco bayesiano e iteración con el método Montecarlo

El conocimiento informativo de los parámetros permite definir el dominio que deben tener, y la distribución de los parámetros puede generar miles de soluciones antes de converger en su distribución posterior. Para lograr esto último, es necesario utilizar métodos numéricos que involucren una gran cantidad de simulaciones para obtener datos confiables.

used to verify that the values of both parameters a and b were normally distributed. The mean and standard deviation of the parameters in Table 1 were used to produce a normal probability distribution in order to use the Bayesian model.

Bayesian framework and iteration with the Montecarlo method

The informing knowledge of the parameters helps defining the domain they should have, and the distribution of the parameters can generate thousands of solutions before converging in their later distribution. In order to achieve this, numeric methods involving a large amount of simulations must be used to obtain reliable data.

The procedure was programmed in the Python 2.7 language (Python Software Foundation, Amsterdam, The Netherlands), which is supported on the module PYMC3 (Salvatier *et al.*, 2016), containing specialized libraries on the implementation of Bayesian models. This module incorporates NUTS (Non-U-turn Sampler) method to update the parameters. The NUTS method is an extension of the Markov chain Montecarlo algorithm. The concept is simple, the more samples are iterated, the values of a *posteriori* parameters will converge in more precise values. The

Cuadro 1. Parámetros a y b recopilados para aplicar el enfoque bayesiano.

Table 1. Parameters a and b gathered in order to use the Bayesian approach.

Cultivo	a	b	Referencia
Trigo	-0.12	1.49	Hunsaker <i>et al.</i> (2005)
Algodón	-0.27	1.33	Rozenstein <i>et al.</i> (2018)
Algodón	-0.09	1.37	[‡] Montgomery <i>et al.</i> (2015)
General [†]	0.17	1.46	Kamble <i>et al.</i> (2013)
General [†]	0.16	1.56	[†] Calera <i>et al.</i> (2003)
General [†]	0.20	1.25	D'Urso y Calera (2006)
Maíz	-0.05	1.09	Neale <i>et al.</i> (1989)
Maíz	-0.03	1.18	Neale <i>et al.</i> (1989)
Maíz	0.03	1.05	Bausch (1993)
Maíz	-0.01	1.08	Bausch (1993)
Maíz	-0.06	1.13	Bausch (1993)
Maíz	-0.11	1.19	Bausch (1993)
Maíz	0.30	0.92	Toureiro <i>et al.</i> (2017)
Maíz	-0.02	1.37	González-Piqueras <i>et al.</i> (2004)
Trigo	-0.26	1.49	Choudhury <i>et al.</i> (1994)
Trigo	-0.14	1.64	Duchemin <i>et al.</i> (2006)
Trigo	-0.18	1.74	Lei y Yang (2014)
Viñedo	-0.10	1.44	Campos <i>et al.</i> (2010)

[†]Ecuación general obtenida de parcelas con cultivos diferentes. ♦

[‡]General equation obtained from plots with different crops.

El procedimiento se programó en el lenguaje Python 2.7 (Python Software Foundation, Amsterdam, The Netherlands), el cual se apoya del módulo PYMC3 (Salvatier *et al.*, 2016) que posee librerías especializadas en la implementación de modelos bayesianos. Dicho módulo incorpora el método NUTS (Non-U-turn Sampler o muestreador sin retornos), para actualizar los parámetros. El método NUTS es una extensión del algoritmo Montecarlo de cadenas de Markov. El concepto es simple, a medida que se iteren más muestras, los valores de los parámetros *a posteriori* convergerán en valores más precisos. El programa se ajustó para que se realizaran 25000 iteraciones del muestreador NUTS, para asegurar una convergencia máxima de los parámetros estimados (el código de programación puede solicitarse a los autores de esta investigación).

La Figura 1 presenta el esquema de ajuste de parámetros con el esquema bayesiano; en la primera parte se define la media (μ) y desviación estándar (σ) de los parámetros *a* y *b* que se tomaron del Cuadro 1. El modelo lineal generalizado (MLG) empleado para ajustar parámetros, supone una distribución normal bivarida en los dos parámetros. Otro supuesto es que los errores están distribuidos normalmente e $-N(0, \sigma^2)$. El MLG, además de la distribución de los parámetros *a priori*, usa los datos de NDVI para obtener una actualización óptima de los parámetros *a posteriori* y al mismo tiempo una estimación del coeficiente de cultivo.

Datos reales de Kc versus NDVI

La incertidumbre del modelo se evaluó con 156 datos pareados de valores de Kc y NDVI, provenientes de evaluaciones en

program was adjusted for 25 000 iterations of the NUTS sampler to be carried out, in order to ensure the maximum convergence of the estimated parameters (the adjustment programming code is available upon request to authors).

Figure 1 presents the parameter adjustment scheme with the Bayesian scheme; the first part defines the mean (μ) and standard deviation (σ) of parameters *a* and *b* taken from Table 1. The generalized linear model (GLM) used to adjust parameters assumed a bivariate normal distribution in both parameters. Another assumption is that the errors are normally distributed e $-N(0, \sigma^2)$. The GLM, not only uses the distribution of the *a priori* parameters, but also the NDVI data to obtain an optimum update of the *a posteriori* parameters, and in the same run, it renders estimation of the crop coefficient.

Real data Kc versus NDVI

The uncertainty of the model was evaluated with 156 paired data values of Kc and NDVI, from evaluations on maize (Choudhury *et al.*, 1994; Toureiro *et al.*, 2017), wheat (Duchemin *et al.*, 2006), and maize, soybean and grass (Kamble *et al.*, 2013; Rozenstein *et al.*, 2018). The data were obtained from samples of dispersal diagrams of Kc and NDVI relations from the aforementioned studies to validate our proposal in this study.

Kc values were obtained from covariance flux towers, soil water balancing methods, and weighing lysimeters; therefore they were considered real field data. For each record of Kc data obtained, we recorded the NDVI value from the processing of digital multispectral images or samples with a radiometer.

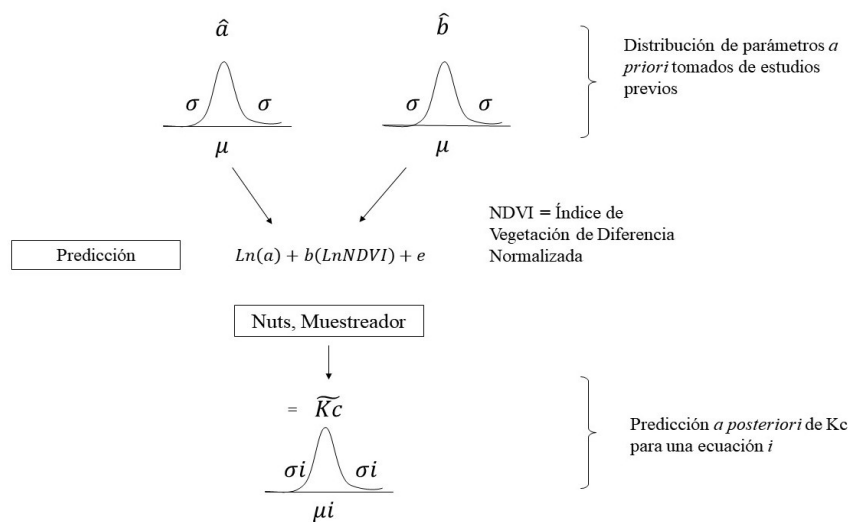


Figura 1. Esquema de la aplicación del enfoque bayesiano para predecir la distribución *a posteriori* y estimar el coeficiente de cultivo.

Figure 1. Application scheme of the Bayesian approach to predict the *a posteriori* distribution, estimating the crop coefficient.

cultivos de maíz (Choudhury *et al.*, 1994; Toureiro *et al.*, 2017), trigo (Duchemin *et al.*, 2006) y maíz, soya y pasto (Kamble *et al.*, 2013; Rozenstein *et al.*, 2018). Los datos se obtuvieron de muestras de los diagramas de dispersión de la relación Kc y NDVI de dichas investigaciones para hacer la validación de la propuesta de este estudio.

Los valores de Kc se obtuvieron de torres de covarianza de torbellinos, métodos de balance de agua del suelo y por lisímetros; por lo tanto, se consideran como datos reales de campo. Para cada dato de Kc obtenido, los autores registraron el valor de NDVI procedente del procesamiento de imágenes digitales multiespectrales o muestras con radiómetro.

El resumen de los 156 registros de Kc y NDVI se presenta en el Cuadro 2. Los datos se obtuvieron en condiciones diferentes de ubicación geográfica, manejo, cultivo y ambientales, y se incluye la cita correspondiente para indagar más sobre cada uno de los estudios.

Evaluación de los modelos

Comparación entre enfoque bayesiano, mínimos cuadrados ordinarios y ecuaciones generales

Para la comparación se realizó una evaluación del EB, mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y las ecuaciones generales propuestas por D'urso y Calera (2006), $Kc = 0.20 + 1.25 * NDVI$, y por Kamble *et al.* (2013), $Kc = 0.17 + 1.46 * NDVI$, en los 156 datos de Kc y NDVI ya descritos. Un manejador de base datos tipo SQL (SQLite v. 3.0) se utilizó para definir los tamaños de muestra (TM) de 5, 10, 30, 60, 90, 120 y 150 registros. Cada TM se probó aleatoriamente, sin remplazo, 1000 veces y se ajustaron a los enfoques propuestos.

Los distintos TM permitieron calcular el Kc. En el caso del EB las simulaciones facilitaron la obtención de los parámetros a

Those paired 156 Kc and NDVI records are summarized in Table 2. Data were obtained under different geographic locations, management, crop and environmental conditions. The corresponding reference is included for further information about those studies.

Evaluation of the models

Comparison between the Bayesian approach, ordinary least squares and general equations

For the comparison, the EB was evaluated along with the ordinary least squares (MCO) and the general equations proposed by D'urso and Calera (2006), $Kc = 0.20 + 1.25 * NDVI$, and by Kamble *et al.* (2013), $Kc = 0.17 + 1.46 * NDVI$, in the 156 Kc and NDVI paired data described paragraphs above. An SQL (SQLite, v. 3.0) database manager was used to define the sample sizes (TM) of 5, 10, 30, 60, 90, 120 and 150 records. Each TM was tested at random, without replacements, 1000 times, and it was adjusted to the suggested approaches.

The different TMs helped calculating the Kc. In the case of EB, the simulations helped obtaining those *a posteriori* parameters that helped to measure the efficiency of estimation, and the respective parameters for MCO were also adjusted. In all cases, the mean squared error (ECM) and the mean absolute error (EMA) were used to estimate error in the different sample sizes. The coefficient of variation (Cv) was also obtained to observe the homogeneity of the error in each TM.

Comparison between the Bayesian approach and specific equations for wheat and maize

Another comparison between specific formulas was carried out for a crop and EB. The Kc *versus* NDVI data by Duchemin

Cuadro 2. Datos de Kc y NDVI usados para realizar las evaluaciones del enfoque bayesiano y formulas generales.

Table 2. Kc and NDVI data used to carry out the evaluations of the Bayesian approach and general formulae.

Cultivo	NDVI		Kc		n	Referencia
	Media	SEE	Media	SEE		
Algodón	0.820	0.070	0.826	0.096	5	Rozenstein <i>et al.</i> (2018)
Maíz	0.509	0.257	0.527	0.389	62	Choudhury <i>et al.</i> (1994)
Maíz, soya, pasto	0.662	0.225	0.800	0.318	23	Kamble <i>et al.</i> (2013)
Maíz	0.659	0.175	0.906	0.182	21	Toureiro <i>et al.</i> (2017)
Trigo	0.516	0.229	0.724	0.299	45	Duchemin <i>et al.</i> (2006)

SEE: Desviación estándar; n: número de registros. ♦ SEE: Standard deviation; n: number of records.

posteriori que sirvieron para medir la eficiencia de la estimación, y para MCO también se ajustaron sus parámetros respectivos. En todos los casos se usó el error cuadrático medio (ECM) y el error medio absoluto (EMA) para estimar el error en los tamaños de muestra diferentes. También se obtuvo el coeficiente de variación (Cv) para observar la homogeneidad del error en cada TM.

Comparación entre enfoque bayesiano y ecuaciones específicas para los cultivos de trigo y maíz

Otra comparación entre fórmulas específicas se realizó para un cultivo y el EB. Los datos Kc *versus* NDVI, de Duchemin (2006) para trigo y Kamble *et al.* (2013) para maíz, se usaron como datos reales. Para estimar Kc en cada caso, se evaluaron las fórmulas de Lei y Yang (2014) para trigo y de Toureiro *et al.* (2017) para maíz. Para el trigo se definieron los TM: 5, 10, 20, 40 y el primer y segundo cuartil de los datos del NDVI. Los TM para el maíz fueron: 5, 10, 20 y el primer y segundo cuartil de los datos de NDVI. En los cuartiles solo se eligió un TM de cinco registros aleatorios sin remplazo para hacer la evaluación. La eficiencia de la estimación se realizó con el error medio absoluto (EMA) y el error cuadrático medio (ECM).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ajuste de los parámetros del enfoque bayesiano y ajustes por mínimos cuadrados ordinarios

Los parámetros a y b para calcular Kc (Cuadro 1) mostraron una correlación negativa ($r = -0.52$, $p \leq 0.05$), y los resultados de la prueba de normalidad revelaron que ambos parámetros tienden a un comportamiento normal ($p \leq 0.05$). Los valores de la media y desviación estándar introducidos al modelo bayesiano fueron -0.064 y 0.149 para el parámetro a , mientras que para el parámetro b los valores fueron 1.321 y 0.218 .

En la estimación de los parámetros *a posteriori* realizados con las 1000 simulaciones para cada tamaño de muestra, se observa que con un TM mayor los parámetros son más compactos en sus valores (Figura 2). En ambos parámetros el EB mostró homogeneidad mayor, mientras que los valores de MCO presentaron datos extremos conforme el TM descendía. Según Grzenda (2015) estos resultados se deben a que la integración del método Montecarlo permitió realizar las simulaciones con tamaños de muestra diferentes, lo cual eliminó ejecuciones de ajuste e intervenciones imprácticas del usuario.

(2006) for wheat, and Kamble *et al.* (2013) for maize, were used as real data. To estimate Kc in each case, the formulas by Lei and Yang (2014) for wheat, and Toureiro *et al.* (2017) for maize, were evaluated. For wheat, 5, 10, 20, 40 TM were defined, along with the first and second quartile of the NDVI data. TM for maize were 5, 10, 20 records, and the first and second quartile of the NDVI data. In quartiles, only the TM with five random records without replacements was chosen to perform the evaluation. The efficiency of the estimation was evaluated with the mean absolute error (EMA) and the mean squared error (ECM).

RESULTS AND DISCUSSION

Adjustment of the parameters in the Bayesian approach and adjustments by ordinary least squares

Parameters a and b to calculate Kc (Table 1) displayed a negative correlation ($r = -0.52$, $p \leq 0.05$); and the results of the normality test revealed that both parameters tend towards a normal distribution ($p \leq 0.05$). The values of the mean and standard deviation used as inputs in the Bayesian model were -0.064 and 0.149 for parameter a ; whereas for parameter b , the values were 1.321 and 0.218 .

The estimation of *a posteriori* parameters from the 1000 simulations for each sample size shows that with a greater TM, parameter values are more compact (Figure 2). In both parameters, EB displayed greater homogeneity, while the MCO values displayed extreme data as TM decreased. According to Grzenda (2015), these results are due to the integration of the Montecarlo method allowing for simulations with different sample sizes, which eliminated adjustment executions, and impractical interventions by the user.

Kruschke (2014) described that the EB recovers an interval of inferential solutions through previous knowledge and local data; rather than an accurate estimation and empirical adjustments, as in the adjustment regression by least squares.

Validation of methods proposed for Kc estimation

Bayesian approach, general equations and the ordinary least squares method

The 1000 simulations showed that reducing the sample size leads to an increased error, as shown by the EMA and the ECM (Figure 3). The EB and MCO

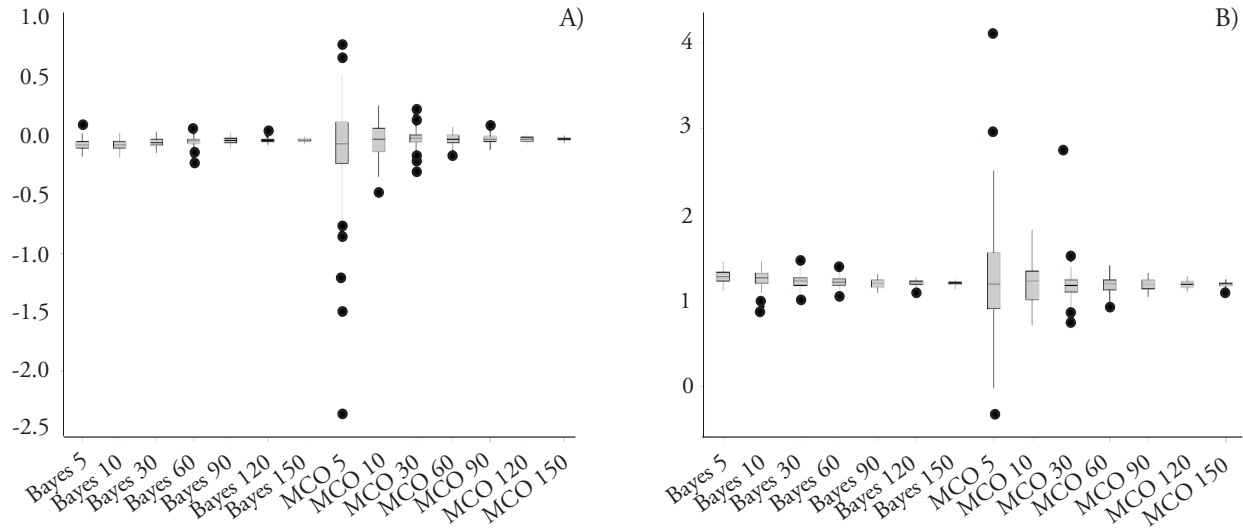


Figura 2. Resultados del ajuste de los parámetros para las 1000 repeticiones en tamaño de muestra diferente. El gráfico de la izquierda son los valores para el parámetro A) y el de la derecha para el parámetro B). Las cajas muestran el rango intercuartílico de los datos para cada TM.
Figure 2. Results of the parameters adjustment for 1000 repetitions in different sample sizes. The graph on the left shows the values for the parameter A) and the graph on the right, for the parameter B). Boxes show the interquartile range of the data for each TM.

Kruschke (2014) describió que el EB recupera un intervalo de soluciones inferenciales a través de conocimiento previo y datos locales; en lugar de una estimación puntual y ajustes empíricos, como sí ocurre en la regresión de ajuste por mínimos cuadrados.

Validación de métodos propuestos para estimar Kc

Enfoque bayesiano, ecuaciones generales y método de mínimos cuadrados

Las 1000 simulaciones mostraron que al disminuir el tamaño de muestra, el error tiende a aumentar, como demuestran el EMA y el ECM (Figura 3). El EB y MCO presentaron un comportamiento homogéneo del error hasta el TM 10. Sin embargo, cuando el TM = 5 el Cv del MCO fue 36.07% mientras que para el EB fue 6.92%.

El MCO mostró un valor máximo de 0.74 de EMA y 0.82 de ECM en el TM=5. Este error fue el más alto de las 1000 simulaciones en los cuatro métodos, lo cual indica que este procedimiento es sensible al error en tamaños de muestra pequeños. Estos resultados son similares a lo documentado por Zhang *et al.* (2013), quienes observaron que el EB resultó

presented a homogenous behavior of the error up to TM 10. However, when TM = 5 the Cv of MCO was 36.07%, whereas it was 6.92% for the EB.

MCO displayed a maximum value of 0.74 for EMA, and 0.82 for ECM when TM=5. This error was the highest out of the 1000 simulations in the four methods, which indicates that this procedure is sensitive to the error in small sample sizes. These results are similar to reports by Zhang *et al.* (2013), who observed that the EB resulted in a lower uncertainty when evaluating the biomass of forest species with different TM. The adaptability of the EB is confirmed by a reduction of uncertainty due to the use of *a priori* probability distributions, since EB helps achieving better results in comparison with the adjustment of frequentist approaches, or general equations because it is integrated on few local data (Sileshi, 2014).

The models by D’urso and Calera (2006) and Kamble *et al.* (2013) displayed high errors in the mean error, with an average of 0.23 and 0.34 of EMA for all sample sizes, and they displayed a heterogenous behavior of the error and high Cv, starting at TM=30. However, the robustness of the EB for each sample size can be observed through the EMA statistics for each method (Table 3). This represents the highest

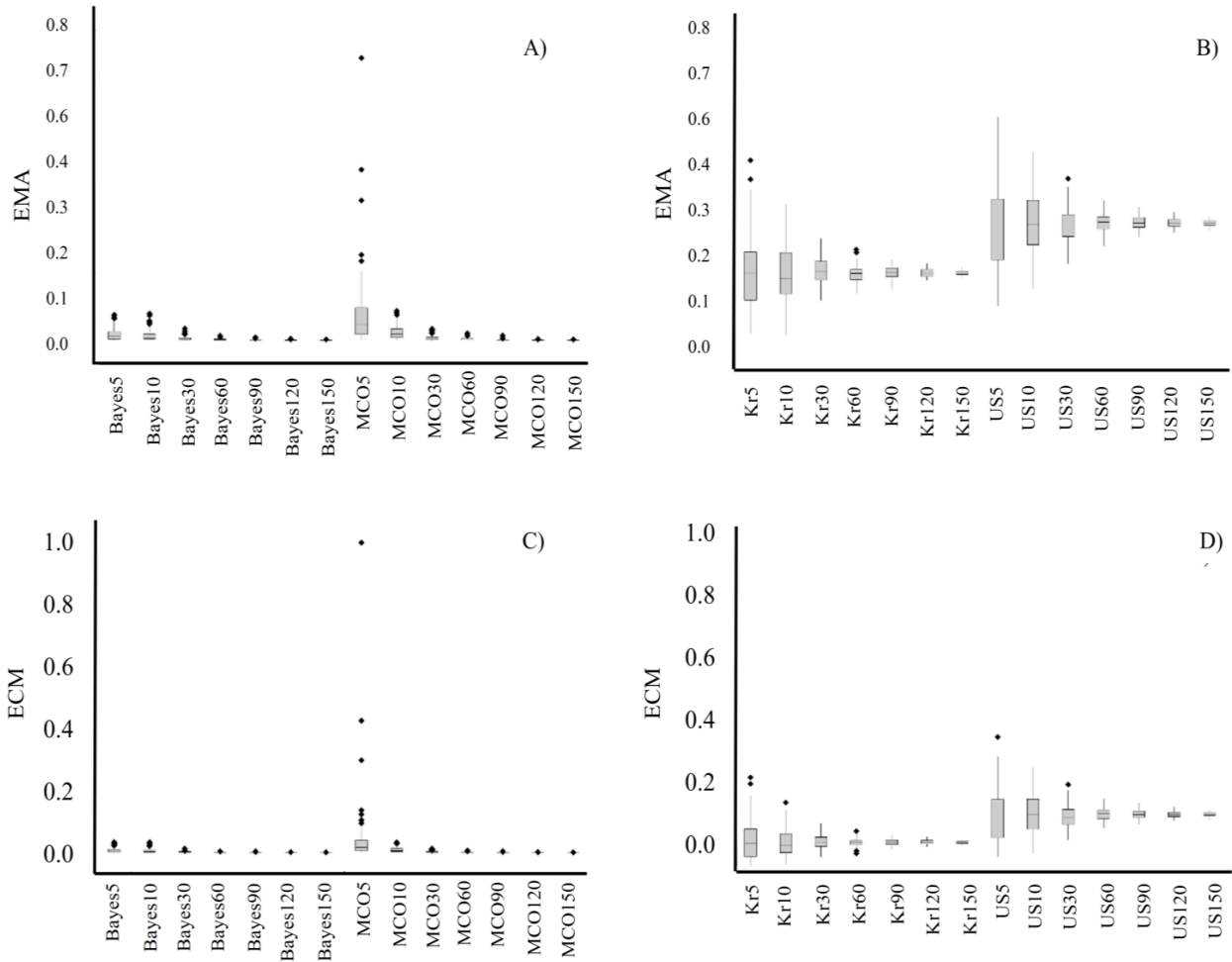


Figura 3. A) Error medio absoluto (EMA) para enfoque bayesiano y mínimos cuadrados ordinarios (MCO) y B) EMA para modelos de Kamble (Kr) y D'urso (Us). C) Error cuadrático medio (ECM) para enfoque bayesiano y mínimos cuadrados ordinarios; D) ECM para modelos de Kamble y D'urso.

Figure 3. A) Mean absolute error (EMA) for the Bayesian approach, and ordinary least squares (MCO); B) EMA for the Kamble (Kr) and D'urso (Us) models; C) Mean squared error (ECM) for the Bayesian approach and ordinary least squares; D) ECM for the Kamble and D'urso models.

con incertidumbre menor al evaluar la biomasa de especies forestales con TM diferente. La adaptabilidad del EB se refleja en un decremento de la incertidumbre, debida al uso de distribuciones de probabilidad *a priori*, porque al integrarse con pocos datos locales permite lograr resultados mejores en comparación con el ajuste de enfoques frecuentistas o ecuaciones generales (Sileshi, 2014).

Los modelos de D'urso y Calera (2006) y Kamble *et al.* (2013) mostraron errores altos en la media del error, con un promedio de 0.23 y 0.34 de EMA para todos los tamaños de muestra, y presentaron un comportamiento heterogéneo del error y Cv altos a partir del TM=30. Pero la robustez del EB para cada

homogeneity at the estimation of mean Kc. In addition, SEE, Cv, minimum (Min), and maximum (Max) of the repetitions were included, since they are important when comparing the variation of error in all four methods (Table 3).

The models by Kamble and D'urso, and Calera require 60 records of Kc *versus* NDVI to obtain the same error variation than the EB in TM = 5, whereas MCO needs 10 pieces of data. Regarding the maximum error that the methods can produce, the EB only increases one EMA of 0.05 from an TM = 150 to a TM = 5. This is significant because it may lead to more accurate estimations of Kc value with few values obtained through field research.

tamaño de muestra se puede observar a través de los estadísticos del EMA para cada método (Cuadro 3). Esto representa una homogeneidad mayor de la media estimada de Kc. Además, se incluyeron la SEE, el Cv, los valores mínimos (Min) y máximos (Max) de las repeticiones, porque resultan importantes al comparar la variación del error en los cuatro métodos (Cuadro 3).

Los modelos de Kamble y D’urso, y Calera necesitan 60 registros de Kc versus NDVI para obtener la misma variación del error que el EB en TM = 5, mientras que el MCO necesita 10 datos. Respecto al error máximo que pueden producir los métodos, el EB solo aumenta un EMA de 0.05 desde un TM = 150 a un TM = 5. Esto es significativo porque puede llevar a estimaciones más precisas del valor de Kc con pocos valores obtenidos en campo.

Nuestro estudio demostró que no es viable usar una ecuación general para estimar Kc, contrario a las recomendaciones de Palacios *et al.* (2011) y Kamble *et al.* (2013). La elección de un modelo empírico es la fuente mayor de incertidumbre (Sileshi, 2014). Por lo tanto, las investigaciones de predicción deberían evitar enfocarse solo en la medida del ajuste del modelo y en observar más la habilidad predictiva del mismo (Zapata-Cuartas *et al.*, 2012).

Our study showed that using a general equation to estimate Ks is not feasible, as opposed to the recommendations by Palacios *et al.* (2011) and Kamble *et al.* (2013). The choice of an empirical model is the greatest source of uncertainty (Sileshi, 2014). Therefore, prediction research should avoid focusing on the measure of models adjustment, and rather observing their predictive ability (Zapata-Cuartas *et al.*, 2012).

Calera *et al.* (2017) pointed out the weaknesses of the Kc-NDVI relation, when adjusted with the frequentist approach. They mentioned that the uncertainties in this relation may be due to the different sensor measurements of NDVI, and differences on image processing. Also, the physiographic and hydrological differences of the sites in which the experiments were implemented (Pôças *et al.*, 2020).

The proposal of this investigation follows the recommendations by Weiskittel *et al.* (2015), which consist in maximizing the existing information to improve the predictions of the crop coefficient. By doing this, the modelling can be used under any management condition or phenological stage, adapting to the differences of the sensor used to generate the indices.

Cuadro 3. Estadísticos del Kc para los cuatro enfoques propuestos en tamaño de muestra diferente.
Table 3. Kc statistics for the four approaches proposed in different samples sizes.

Método	Estimador	5	10	30	60	90	120	150
Enfoque bayesiano	Media	0.172	0.170	0.165	0.162	0.162	0.161	0.161
	SEE	0.012	0.011	0.004	0.002	0.001	0.001	0
	Cv	6.92	6.28	2.47	1.08	0.76	0.42	0.26
	Min	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161
	Max	0.213	0.216	0.185	0.17	0.167	0.164	0.162
Mínimos cuadrados	Media	0.214	0.177	0.165	0.163	0.162	0.161	0.161
	SEE	0.077	0.013	0.005	0.003	0.001	0	0
	Cv	36.07	7.59	3.07	1.68	0.8	0.29	0.22
	Min	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161	0.161
	Max	0.743	0.221	0.184	0.175	0.17	0.163	0.162
Kramble <i>et al.</i> (2013)	Media	0.236	0.232	0.237	0.231	0.234	0.233	0.234
	SEE	0.08	0.063	0.03	0.017	0.015	0.01	0.006
	Cv	33.88	27.22	12.85	7.33	6.22	4.36	2.45
	Min	0.092	0.088	0.169	0.184	0.194	0.216	0.22
	Max	0.496	0.393	0.314	0.288	0.264	0.255	0.246
D’Urso y Calera (2006)	Media	0.346	0.351	0.343	0.35	0.35	0.35	0.35
	SEE	0.091	0.066	0.037	0.023	0.016	0.01	0.008
	Cv	26.34	18.85	10.73	6.5	4.49	2.79	2.18
	Min	0.157	0.197	0.255	0.296	0.316	0.328	0.331
	Max	0.597	0.517	0.453	0.401	0.387	0.375	0.365

Calera *et al.* (2017) señalaron las debilidades de la relación Kc-NDVI ajustadas con el enfoque frecuentista; mencionaron que las incertidumbres asociadas con esta relación pueden deberse a las mediciones de NDVI con sensor y procesamiento de la imagen diferentes; además de las diferencias fisiográficas e hidrológicas de los sitios donde se llevaron a cabo los experimentos de los cultivos (Pôças *et al.*, 2020).

La propuesta de esta investigación sigue las recomendaciones de Weiskittel *et al.* (2015), que consiste en maximizar la información existente para mejorar las predicciones del coeficiente del cultivo y que la modelación se pueda utilizar en cualquier condición de manejo y etapa fenológica, además de adecuarse a las diferencias del sensor usado para generar los índices.

Validación en datos de maíz y trigo

Los estadísticos asociados con el método bayesiano y la función de Toreiro *et al.* (2017) para estimar Kc del maíz mostraron que el modelo bayesiano presentó incertidumbre menor en los TM y cuartiles empleados (Cuadro 4). En promedio, el EB presentó un valor medio de 0.10 y la desviación estándar de 0.01, mientras en el modelo de Toureiro el promedio fue 0.19 y 0.02 de desviación estándar. El Cv y los valores extremos fueron más bajos en el modelo bayesiano para todos los TM.

Los dos métodos mostraron que el primer cuartil obtuvo un Cv menor en comparación con el TM=5 y el segundo cuartil; sin embargo, el EB mostró certidumbre mayor. Esto es muy importante para los enfoques operacionales porque muestra que con cinco

Validation in maize and wheat data

The statistics associated with the Bayesian approach and the function by Toreiro *et al.* (2017) to estimate the Kc of maize showed that the Bayesian model displayed lower uncertainty in the TM and quartiles used (Table 4). On average, EB presented a mean value of 0.10 and a standard deviation of 0.01; whereas in the model by Toureiro, the average was 0.19 with a standard deviation of 0.02. The Cv and the extreme values were lower in the Bayesian model for all TM.

Both methods showed that the first quartile obtained a lower Cv in comparison with TM=5 and the second quartile, although EB displayed a higher certainty. This is very important for operational approaches, since it shows that with five records of Kc and NDVI obtained in the first stages of the established crop, it is possible to obtain reliable data to be able to estimate Kc. The results for wheat, between the Bayesian approach, and the function by Lei y Yang (2014) showed for 40 records (Table 5), that EB presented a Cv of 0.02%, whereas the model by Lei and Yang displayed a Cv of 5.45%.

For five records, EB displayed a Cv of 6.36% in comparison with 40% of the model by Lei and Yang. It is worth emphasizing that the EB with five records showed such a Cv value; whereas, in order to reach a similar variation, the model by Lei and Yang required 40 records. That is, nearly the 43 records which were the total size of the population used in that analysis. In the first quartile, the EB was 25.7% more homogenous than the method by Lei and Yang; whereas in the second quartile, it was 17.49%

Cuadro 4. Estadísticos obtenidos en tamaño de muestra diferente al evaluar la estimación de Kc para cultivos de maíz. 1Q (primer cuartil), 2Q (segundo cuartil).

Table 4. Statistics obtained in different sample sizes when evaluating the estimation of Kc for maize. 1Q (first quartile), 2Q (second quartile).

Método	Estimador	5	10	20	1Q	2Q
Enfoque bayesiano	Media	0.09	0.10	0.10	0.10	0.11
	SEE	0.02	0.01	0.00	0.01	0.01
	Max	0.18	0.13	0.10	0.13	0.15
	Cv	25.0	7.29	1.04	10.4	14.5
Toureiro <i>et al.</i> (2017)	Media	0.15	0.15	0.15	0.26	0.23
	SEE	0.04	0.02	0.00	0.01	0.02
	Max	0.26	0.22	0.17	0.28	0.29
	Cv	41.6	26.0	8.33	16.6	30.2

registros de Kc y NDVI obtenidos en las primeras etapas del cultivo establecido, se pueden obtener datos confiables para poder estimar Kc. Los resultados para el cultivo de trigo entre el enfoque bayesiano y la función de Lei y Yang (2014) mostraron en 40 registros (Cuadro 5) que el EB presentó un Cv de 0.02%, mientras que el modelo de Lei y Yang mostró un Cv de 5.45%.

El EB con cinco registros mostró un Cv de 6.36%, y es importante de resaltar comparado con el 40% del modelo de Lei y Yang; porque EB con solo cinco datos mostró un valor de Cv para el cual, el modelo de Lei y Yang necesitó 40 registros para alcanzar una variación similar. Esto representa, casi los 43 registros del total del tamaño de la población usada para ese análisis. En el primer cuartil, el EB fue 25.7% más homogéneo que el de Lei y Yang; mientras que en el segundo cuartil fue 17.49% más homogéneo. En el EB los Cv del primero y segundo cuartil fueron menores que 10%, lo cual indica que los errores fueron homogéneos. En el caso del modelo de Lei y Yang, los Cv del primero y segundo cuartil mostraron ser heterogéneos, con valores de 31.82 y 36.36%, respectivamente. Lo anterior confirma la robustez del EB para reducir la incertidumbre del error y evitar datos extremos que subestimen o sobrestimen el dato real de Kc.

Los resultados mostraron la misma tendencia que en el apartado anterior, el EB bayesiano presentó incertidumbre menor que las ecuaciones de Lei y Yang (2014) para trigo y Toureiro *et al.* (2017) para maíz, en cada TM. Por lo tanto, el EB se convierte en un método operativo que puede usar pocas imágenes satelitales dentro de un ciclo agrícola, ya que se pueden

more homogenous. In the EB, the Cv of the first and second quartiles were below 10%, indicating that errors were homogenous. In the case of the model by Lei and Yang, the Cv of the first and second quartile displayed heterogeneity, with values of 31.82 and 36.36%, respectively. This confirms the robustness of the EB to reduce the uncertainty of error, and to avoid extreme data that may underestimate or overestimate the real Kc data.

The results showed the same tendency than in the previous section; the EB showed a lower uncertainty than in the equations by Lei and Yang (2014) for wheat, and by Toureiro *et al.* (2017) for maize, in each TM. Therefore, the EB becomes an operative method that can use few satellite images within a single agricultural cycle, since images in some dates with cloudy skies can be omitted. The reduction of uncertainty signifies large savings of water volumes when irrigating, and becomes an inclusive methodology for precision agriculture (Calera *et al.*, 2017). In addition, EB can be applied in regions in which users lack financial resources to specifically calibrate the Kc-NDVI relation .

A limitation of this study is that the parameters used to analyze the Bayesian approach came from bibliographical sources that did not give details in the information on irrigation management, or on the color of soils in the experiments carried out to generate the parameters of the Kc(NDVI) functions. Due to this, it is unknown whether the crop coefficient was obtained under stress-free conditions (base crop coefficient or Kcb) or in field conditions (Kc) usually under stress. These crop management and field conditions should be considered when replicating the technique for operational use.

Cuadro 5. Estadísticos obtenidos en tamaño de muestra diferente para evaluar la estimación de Kc para datos de trigo.

Table 5. Statistics obtained in different sample sizes to evaluate the Kc estimation for wheat.

Método	Estimador	5	10	20	40	1Q	2Q
Enfoque bayesiano	Media	0.12	0.11	0.11	0.11	0.12	0.11
	StdDev	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
	Max	0.15	0.13	0.12	0.11	0.16	0.15
	Cv	6.36	3.64	3.64	0.02	8.18	6.36
Lei y Yang (2014)	Media	0.14	0.15	0.14	0.14	0.19	0.13
	StDev	0.04	0.03	0.02	0.01	0.04	0.04
	Max	0.28	0.21	0.17	0.16	0.28	0.23
	Cv	40.00	26.36	14.55	5.45	31.82	36.36

omitir algunas fechas que presenten nubosidad. La reducción de la incertidumbre se traduce en ahorros grandes de volúmenes de agua al irrigar y se convierte en una metodología incluyente para la agricultura de precisión (Calera *et al.*, 2017). Además, EB se puede aplicar en regiones donde los usuarios no tienen los recursos financieros para poder calibrar la relación Kc-NDVI en específico.

Una limitante de este estudio es que los parámetros usados para analizar el enfoque bayesiano provinieron de fuentes bibliográficas que no indicaron información detallada sobre el manejo del riego ni el color del suelo en los experimentos realizados para generar los parámetros de las funciones Kc(NDVI). Por ello, no se conoce si el coeficiente del cultivo se obtuvo bajo condiciones sin estrés (coeficiente de cultivo basal o Kcb) o en condiciones de campo (Kc) usualmente bajo estrés. Estas condiciones de manejo del cultivo y de la parcela se deberán considerar al replicar la técnica para uso operacional.

CONCLUSIONES

El enfoque bayesiano utilizado redujo la incertidumbre asociada con la estimación del coeficiente de cultivo a través de índices de vegetación. Las simulaciones creadas permitieron observar el error de estimación en tamaño de muestra diferente. En cada una de ellas el enfoque bayesiano mostró ser la metodología con el error menor en comparación con el ajuste por mínimos cuadrados o por formulas generales. La comparación del enfoque bayesiano con ecuaciones específicas mostró incertidumbre menor para los cultivos de maíz y trigo, en todos los tamaños de muestra.

En la evaluación del primer y segundo cuartiles de los datos, el enfoque bayesiano demostró que con solo cinco datos aleatorios dentro del primer cuartil es suficiente para obtener estimaciones de incertidumbre baja. La información recopilada *a priori* permitió desarrollar ecuaciones nuevas que mejoran las estimaciones del coeficiente de cultivo en comparación con las estimaciones frecuentistas usadas de manera habitual.

LITERATURA CITADA

Allen, R. G., L. S. Pereira, T. A. Howell, and M. E. Jensen. 2011. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manage.* 98: 899-920. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.12.015.

CONCLUSIONS

The Bayesian approach reduced the uncertainty related to the estimation of the crop coefficient through vegetation indices. The created simulations helped to accurately observe the estimation error in different sample sizes. In each one of them, the Bayesian approach proved to be the methodology with the lowest error, in comparison with the adjustment by least squares or by general formulas. The comparison of the Bayesian approach with specific equations presented less uncertainty for maize and wheat crops in all sample sizes.

In the evaluation of the first and second data quartiles, the Bayesian approach proved that only five random data in the first quartile are enough to obtain low uncertainty estimations. The information gathered *a priori* helped to develop new equations that improve estimations of that coefficient in comparison with the frequentist estimations regularly used.

—End of the English version—

-----*-----

- Bausch, W. C. 1993. Soil background effects on reflectance-based crop coefficients for corn. *Rem. Sens. Environ.* 46: 213-222. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90096-G.
- Campos, I., C. M. Neale, A. Calera, C. Balbontín, and J. González-Piqueras. 2010. Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). *Agric. Water Manage.* 98: 45-54. DOI: 10.1016/j.agwat.2010.07.011.
- Calera, A., I. Campos, A. Osann, G. D'Urso, and M. Menenti. 2017. Remote sensing for crop water management: from ET modelling to services for the end users. *Sensors* 17: 1104. DOI: 10.3390/s17051104.
- Colin, J., M. Menenti, E. Rubio, and A. Jochum. 2006. A Multi-Scales Surface Energy Balance System for Operational Actual Surface Evapotranspiration Monitoring. DOI: 10.1063/1.2349342.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2018. Estadísticas del agua en México: Comisión Nacional del Agua Ciudad de México, México. http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf (Consulta: agosto 2019).
- Choudhury, B. J., N. U. Ahmed, S. B. Idso, R. J. Reginato, and C. S. Daughtry. 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Rem. Sens. Environ.* 50: 1-17. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90090-6.
- D'Urso, G., and A. Calera Belmonte. 2006. Operative approaches to determine crop water requirements from Earth Observation data: methodologies and applications. DOI: 10.1063/1.2349323.

- Duchemin, B., R. Hadria, S. Erraki, G. Boulet, P. Maisongrande, A. Chehbouni, and M. Kharrou. 2006. Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely-sensed vegetation indices. *Agric. Water Manage.* 79: 1-27. DOI: 10.1016/j.agwat.2005.02.013.
- González-Piqueras, J., A. Calera, M. A. Gilabert, A. Cuesta, and F. De la Cruz Tercero. 2004. Estimation of crop coefficients by means of optimized vegetation indices for corn. *Rem. Sens. Agric. Ecosys. Hydrol.* Vol. 5232- pp. 110-118. DOI: 10.1117/12.511317.
- Grzenda, W. 2015. The advantages of Bayesian methods over classical methods in the context of credible intervals. *Information Syst. Manage.* 4: 53-63.
- Hunsaker, D. J., P. J. Pinter, and B. A. Kimball. 2005. Wheat basal crop coefficients determined by normalized difference vegetation index. *Irrig. Sci.* 24: 1-14. DOI: 10.1007/s00271-005-0001-0.
- Kamble, B., A. Kilic, and K. Hubbard. 2013. Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. *Rem. Sens.* 5: 1588-1602. DOI: 10.3390/rs5041588.
- Kruschke, J. 2014. *Doing Bayesian data analysis: A tutorial with R, JAGS, and Stan*: Academic Press. EE. UU: Elsevier. DOI: 10.1016/C2012-0-00477-2.
- Lei, H., and D. Yang. 2014. Combining the crop coefficient of winter wheat and summer maize with a remotely sensed vegetation index for estimating evapotranspiration in the North China plain. *J. Hydrol. Eng.* 19: 243-251. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000765.
- Neale, C. M., W. C. Bausch, and D. F. Heermann. 1989. Development of reflectance-based crop coefficients for corn. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 32: 1891-1899. DOI: 10.13031/2013.31240.
- Odi-Lara, M., I. Campos, C. M. Neale, S. Ortega-Farías, C. Poblete-Echeverría, C. Balbontín, and A. Calera. 2016. Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensing-based soil water balance. *Remote Sens.* 8: 253. DOI: 10.3390/rs8030253.
- Palacios-Vélez, E., J. E. Palacios-Sánchez, and L. A. Palacios-Sánchez. 2011. *Agricultura de riego asistida con satélites*. *Tecnol. y Cienc. del Agua* 2: 69-81. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v2n2/v2n2a5.pdf>
- Pôças, I., A. Calera, I. Campos, and M. Cunha. 2020. Remote sensing for estimating and mapping single and basal crop coefficients: A review on spectral vegetation indices approaches. *Agric. Water Manage.* 233: 106081. DOI: 10.1016/j.agwat.2020.106081.
- Rozenstein, O., N. Haymann, G. Kaplan, and J. Tanny. 2018. Estimating cotton water consumption using a time series of Sentinel-2 imagery. *Agric. Water Manage.* 207: 44-52. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.05.017.
- Salvatièr, J., T. Wieckià, and C. Fonnesbeck. 2016. *PyMC3: Python probabilistic programming framework*. ASCL: ascl-1610.
- Sileshi, G. W. 2014. A critical review of forest biomass estimation models, common mistakes and corrective measures. *Forest Ecol. Manage.* 329: 237-254. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.06.026.
- Shirley, R., E. Pope, M. Bartlett, S. Oliver, N. Quadrianto, P. Hurley, and J. Bacon. 2020. An empirical, Bayesian approach to modelling crop yield: Maize in USA. *Environment. Res. Comm.* 2(2): 025002. DOI: 10.1088/2515-7620/ab67f0.
- Toureiro, C., R. Serralheiro, S. Shahidian, and A. Sousa. 2017. Irrigation management with remote sensing: Evaluating irrigation requirement for maize under Mediterranean climate condition. *Agric. Water Manage.* 184: 211-220. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.02.010.
- Wang, M., Q. Liu, L. Fu, G. Wang, and X. Zhang. 2019. Airborne LIDAR-Derived aboveground biomass estimates using a Hierarchical Bayesian approach. *Remote Sens.* 11: 1050. DOI: 10.3390/rs11091050.
- Weiskittel, A. R., D. W. MacFarlane, P. J. Radtke, D. L. Affleck, H. Temesgen, C. W. Woodall, and J. W. Coulston. 2015. A call to improve methods for estimating tree biomass for regional and national assessments. *J. Forestry.* 113: 414-424. DOI: 10.5849/jof.14-091.
- Zapata-Cuartas, M., C. A. Sierra, and L. Alleman. 2012. Probability distribution of allometric coefficients and Bayesian estimation of aboveground tree biomass. *Forest Ecol. Manage.* 277: 173-179. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.04.030.
- Zhang, D., X. Yan, Z. L. Yang, A. Wall, and J. Wang. 2013. Incorporation of formal safety assessment and Bayesian network in navigational risk estimation of the Yangtze River. *Reliab. Eng. Syst. Safe.* 118: 93-105. DOI: 10.1016/j.res.2013.04.006.

6-BENZYLAMINOPURINE AND 2, 4-DICHLOROPHENOXYACETIC ACID EFFECT ON CALLUS GENESIS OF *Brosimum alicastrum*

EFFECTO DE 6-BENCILAMINOPURINA Y ÁCIDO 2,4-DICLOROFENOXIACÉTICO EN LA CALLOGÉNESIS DE *Brosimum alicastrum*

Angel Virgilio Domínguez-May^{1*}, José Augusto Nah-Hau¹, Israel García-Sheseña², Sara Luz Nahuat-Dzib³, José Luis Giorgana-Figueroa³, Estefanía Escalante-Zapata⁴, José Efraín Ramírez-Benítez⁴, Ana Paula Gamba-Galeazzis⁵

¹Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico Superior del Sur del Estado de Yucatán. Carretera Muna-Felipe Carrillo Puerto. Tramo Oxkutzcab-Akil. Km 41+400. 97880. Oxkutzcab, Yucatán, México. (virgiliomay@hotmail.com). ²Parque Científico Tecnológico de Yucatán A.C. Km 5.5. Carretera Sierra Papacal-Chuburná. 97302. Sierra Papacal, Yucatán, México. ³Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Mérida. Km 5. Carretera Mérida-Progreso. 97118. Mérida, Yucatán, México. ⁴Facultad de Ciencias Químico Biológicas/ Universidad Autónoma de Campeche. Avenida Ingeniero Humberto Lanz Cárdenas S/N Colonia Ex-Hacienda Kalá. 24085. San Francisco de Campeche, Campeche, México. ⁵Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Avenida Universidad 3000, Ciudad Universitaria, Coyoacán, 04510.

ABSTRACT

Brosimum alicastrum seeds contain a high percentage of protein and essential amino acids that contribute to a proper nutrition. This tree is an alternative in the so-called crusade against hunger and its management does not involve the use of agrochemicals. The objective of this research was to evaluate the morphogenic response of foliar explants with two growth regulators, 6-Benzylaminopurine (BAP) and 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D) in the induction of *calli*. Results demonstrated that the combination of 1.5 mg L⁻¹ BAP and 1 mg L⁻¹ 2,4-D (TM) and 1.5 mg L⁻¹ BAP with 2 mg L⁻¹ 2,4-D (TN) favored callus growth in 100% of foliar explants. *Calli* were grown in a period of 20 d, in a culture room at 25 ± 4 °C, with 16 h of illumination. Under these conditions, *calli* remained in slow growth for four weeks. Those explants that generated callus were sub-cultured in fresh medium without activated charcoal. In TM and TN treatments, the multiplication of the cell mass was favored; in TN globular structures were formed. However, explants the same treatments TM and TN with activated charcoal, and under ambient 29 ± 4 °C conditions increased callus growth, but became friable at two weeks. Thus, TM and TN were the better treatments, but activated charcoal was determined to have a negative effect on callus growth.

RESUMEN

Las semillas de *Brosimum alicastrum* contienen un porcentaje alto de proteínas y aminoácidos esenciales que contribuyen a una nutrición adecuada. Este árbol es una alternativa para la llamada cruzada contra el hambre y su manejo no implica el uso de agroquímicos. El objetivo de esta investigación fue evaluar la respuesta morfogénica de los explantes foliares con dos reguladores de crecimiento: la 6-Bencilaminopurina (BAP) y el Ácido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D) en la inducción de callos. Los resultados demostraron que la combinación de 1.5 mg L⁻¹ de BAP y 1 mg L⁻¹ de 2,4-D (TM) y 1.5 mg L⁻¹ de BAP con 2 mg L⁻¹ de 2,4-D (TN) favorecieron el crecimiento de callos en el 100% de los explantes foliares. Los callos se dejaron crecer por un periodo de 20 d, en una sala de cultivo a 25 ± 4 °C, con 16 h de iluminación. En estas condiciones, los callos permanecieron en crecimiento lento durante cuatro semanas. Los explantes que generaron callo se subcultivaron en medio fresco sin carbón activado. Los tratamientos TM y TN favorecieron la multiplicación de la masa celular; con TN se formaron estructuras globulares. Sin embargo, los mismos tratamientos TM y TN con carbón activado y en condiciones ambientales 29 ± 4 °C, incrementaron el crecimiento de callos, pero se volvieron friables a las dos semanas. Por lo tanto TM y TN fueron los tratamientos mejores, pero se determinó que el carbón activado tuvo un efecto negativo sobre el crecimiento de callo.

* Author for correspondence ♦ Autor para correspondencia.
Received: April, 2020. Approved: December, 2020.
Published as ARTICLE in *Agrociencia* 55: 133-144. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2391>

Palabra clave: ramón, reguladores de crecimiento, BAP, 2,4-D, *Brosimum alicastrum*, callogénesis.

Key words: breadnut, growth regulators, BAP, 2,4-D, *Brosimum alicastrum*, callus genesis.

INTRODUCTION

The Breadnut (*Brosimum alicastrum*) is a tropical tree distributed in the tropical and subtropical forests of Mexico and Central America. Scientific name comes from the Greek *Brosimos*, which means “edible.” In Mexico and Belize, it is known as breadnut or *oox* in the Mayan language (Meiners *et al.*, 2009), and individual trees may be male or female. This tree can produce fruit up to 56 Mg ha⁻¹; therefore, it would help the so-called crusade against hunger. This tree does not cause soil erosion, and its management does not involve the use of agrochemicals (Hernández-González *et al.*, 2015). It can also be used for the preparation of products for human and livestock consumption (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017), because of its high protein and other nutrients.

Breadnut is important for research about its benefits; it may be an alternative against excessive consumption of corn (*Zea mays*) in Mexico. Since 2011, our research group has published about the relevance of incorporating this tree to the governmentally called crusade against hunger (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017). The Academy of Sciences of The United States considered breadnut tree as one of the underexploited species with promising economic value (La Jornada, 2013). The genetic variability of sexual reproduction in this species is the reason why there are no commercial plantations yet.

Plant biotechnology strategies would lead to establish clones with desirable characteristics and able to produce plenty of biological material from this tree. Besides, it is considered as a recalcitrant timber species, with a high added value (Peña-Ramírez *et al.*, 2011). The process of somatic embryogenesis is an alternative for the clonal propagation of elite individuals to be phenotypically identical or simply germplasm to preserve the genetic material of the species (Cardoso *et al.*, 2018; Guan *et al.*, 2016).

Plant tissue culture is based on the induction of the morphogenic response of a plant explant using growth regulators contained in a basal culture medium. The observed morphogenic response is a function of the composition of the basal medium,

INTRODUCCIÓN

El ramón (*Brosimum alicastrum*) es un árbol distribuido en los bosques tropicales húmedos y semihúmedos de México y Centroamérica. El nombre científico proviene del griego *brosimos*, que significa “comestible.” En algunos lugares de México y Belice, se le conoce como *oox* en lengua Maya, es decir, árbol de pan (Meiners *et al.*, 2009). Los individuos de esta especie de árbol pueden ser masculinos o femeninos. Los femeninos pueden producir hasta 56 Mg ha⁻¹; de fruto. De modo que podría ser un aliado en la así llamada cruzada contra el hambre. Este árbol no causa erosión en el suelo y su manejo no involucra el uso de agroquímicos (Hernández-González *et al.*, 2015). También puede utilizarse para preparar productos para consumo humano y del ganado (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017), por sus contenidos de proteína altos y otros nutrientes.

B. alicastrum es importante para la investigación debido a sus beneficios; puede ser una alternativa al consumo excesivo de maíz (*Zea mays*) en México. Desde 2011, nuestro grupo de investigación ha publicado sobre la relevancia de incorporar este árbol a la cruzada gubernamental contra el hambre (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017). La Academia de Ciencias de Estados Unidos consideró al ramón como una de las especies subexplotadas con un valor económico prometedor (La Jornada, 2013). La variabilidad genética en la reproducción dioica de esta especie es la razón por la cual aún no existen plantaciones comerciales.

Las estrategias basadas en biotecnología vegetal permitirían establecer clones con características deseables y capaces de producir suficiente material biológico de este árbol. Además, se considera una especie maderable recalcitrante, con un valor alto añadido (Peña-Ramírez *et al.*, 2011). El proceso de embriogénesis somática se ha convertido en una alternativa para la propagación clonal de individuos élite para que sean fenotípicamente idénticos o simplemente germoplasma para preservar el material genético de la especie (Cardoso *et al.*, 2018; Guan *et al.*, 2016).

El cultivo de tejidos vegetales se basa en la inducción de la respuesta morfogénica de un explante vegetal mediante reguladores del crecimiento contenidos en un medio de cultivo basal. La respuesta morfogénica observada, de acuerdo con Phillips y Garda (2019) es función de la composición del medio basal,

concentration of phytohormones and culture conditions, as well as the study model and type of explant, according to Phillips and Garda (2019).

Auxins and cytokinins are the most widely used growth regulators, with a preference for the use of synthetic compounds due to their greater stability and morphogenic power compared to those of natural origin (Herman, 2015). The most commonly used auxins are α -naphthalene-acetic acid (NAA), indole-3-butyric acid (IBA), 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D), indole-3-acetic acid (IAA), and Picloram. While the most frequently used cytokines are 6-benzylaminopurine and kinetin (Herman, 2015). Other growth regulators to consider are gibberellins, anti-gibberellins, ethylene blockers, abscisic acid, and brassino-steroids. Many morphogenic responses ranging from callus genesis to somatic embryogenesis and shoot induction were observed in *Trifolium pratense* L. (red clover), because of altering the balance of growth regulators in the induction medium (Phillips and Collins, 1984).

It is a priority for any future Breadnut germplasm conservation, propagation, and improvement program, to establish the conditions for induction of the *in vitro* morphogenic response. In particular, the identification of those conditions that determine relative concentrations of growth regulators. Therefore, the objective of our study was to evaluate the response of leaf explants of *Brosimum alicastrum* in callus genesis in the presence of different concentrations and combinations of 6-benzylaminopurine (BAP) and 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D).

MATERIALS AND METHODS

Plant material

The leaf explants of *B. alicastrum* were collected on September from a 5-years-old tree specimen found at Parque Científico y Tecnológico de Yucatán A.C., a unit of the CICY Germplasm Bank, Mexico.

Decontamination process

Decontamination process began with trimming leaves from collected branches of *B. alicastrum*, the younger leaves were selected and placed in water with liquid detergent. Leaves were washed with a sponge, very carefully to avoid any damage, and they were deposited in a beaker containing citric acid solution (100 mg L⁻¹). Decontamination process continued in the laminar

la concentración de fitohormonas y las condiciones de cultivo, así como del modelo de estudio y el tipo de explante.

Las auxinas y citoquininas son los reguladores de crecimiento más utilizados, y se prefiere el uso de compuestos sintéticos por su mayor estabilidad y poder morfogénico en comparación con los de origen natural (Herman, 2015). Las auxinas más utilizadas son el ácido α -naftaleno-acético (NAA), el ácido indol-3-butírico (IBA), el ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), el ácido indol-3-acético (IAA) y el Picloram. Mientras que las citoquininas más utilizadas son la 6-benzilaminopurina y la kinetina (Herman, 2015). Otros reguladores del crecimiento que se consideran son las giberelinas, las anti giberelinas, los bloqueadores del etileno, el ácido abscísico y los brasinoesteroides. Muchas respuestas morfogénicas, las cuales van de la callogénesis a la embriogénesis somática e inducción de brotes aéreos se observaron en el trébol rojo (*Trifolium pratense* L.), debido a alteraciones en el balance de los reguladores de crecimiento en el medio para inducción (Phillips and Collins, 1984).

Para cualquier programa futuro de conservación, propagación y mejora del germoplasma de ramón es prioritario establecer las condiciones para la inducción de la respuesta morfogénica *in vitro*. En especial, la identificación de aquellas que determinan las concentraciones relativas de los reguladores de crecimiento. Por lo tanto, el objetivo de nuestro estudio fue evaluar la respuesta de los explantes foliares de *Brosimum alicastrum* para callogénesis en presencia de concentraciones y combinaciones diferentes de 6-bencilaminopurina (BAP) y ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D).

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Los explantes foliares de *B. alicastrum* se colectaron en septiembre de un ejemplar arbóreo de 5 años que se encuentra en el Parque Científico y Tecnológico de Yucatán A.C., unidad del Banco de Germoplasma del CICY, México.

Proceso de descontaminación

Para el proceso de descontaminación se recortaron las hojas de las ramas colectadas de *B. alicastrum*, se seleccionaron las hojas más jóvenes y se colocaron en agua con detergente líquido. Con

flow hood. Leaves were taken with sterile pliers, and placed in a 250 mL flask with distilled water, Captan fungicide 50 (3 g L^{-1}) plus Tween 20 were added, and the beaker was shaken for 60 min. The solution was removed from the flask, and leaves were rinsed twice with distilled water, each rinse for 1 min.

Subsequently, leaves were immersed in a PPM antibiotic solution (1.5 mL L^{-1}) for 40 min. Afterwards the solution of the flask was removed and rinsed with sterile distilled water for 1 min. Next, leaves were maintained in 70% ethanol for 2 min. Then, alcohol was removed and leaves rinsed with distilled water. To finish decontamination process, leaves were immersed 30 min in a solution of 30% sodium hypochlorite, and three rinses were made with distilled water for 1 min each. At the end, each leaf was cut top and bottom, and explants were obtained, size around 1.5 cm^2 (Figure 1E).

una esponja se lavaron con mucho cuidado para evitar cualquier daño y se depositaron en un vaso de precipitados que contenía una solución de ácido cítrico (100 mg L^{-1}). El proceso de descontaminación continuó en la campana de flujo laminar. Con pinzas estériles se tomaron las hojas y se colocaron en un matraz de 250 mL con agua destilada, se añadió el fungicida Captan 50 (3 g L^{-1}) más Tween 20 y se agitó durante 60 min. La solución se retiró del matraz y las hojas se enjuagaron dos veces con agua destilada; cada enjuague durante 1 min.

A continuación, las hojas se sumergieron en una solución de antibiótico PPM (1.5 mL L^{-1}) durante 40 min. Después, se retiró la solución del frasco y se enjuagó con agua destilada estéril durante 1 min. A continuación, las hojas se mantuvieron en alcohol etanol al 70% durante 2 min. Luego, se retiró el etanol y las hojas se enjuagaron con agua destilada. Para finalizar el

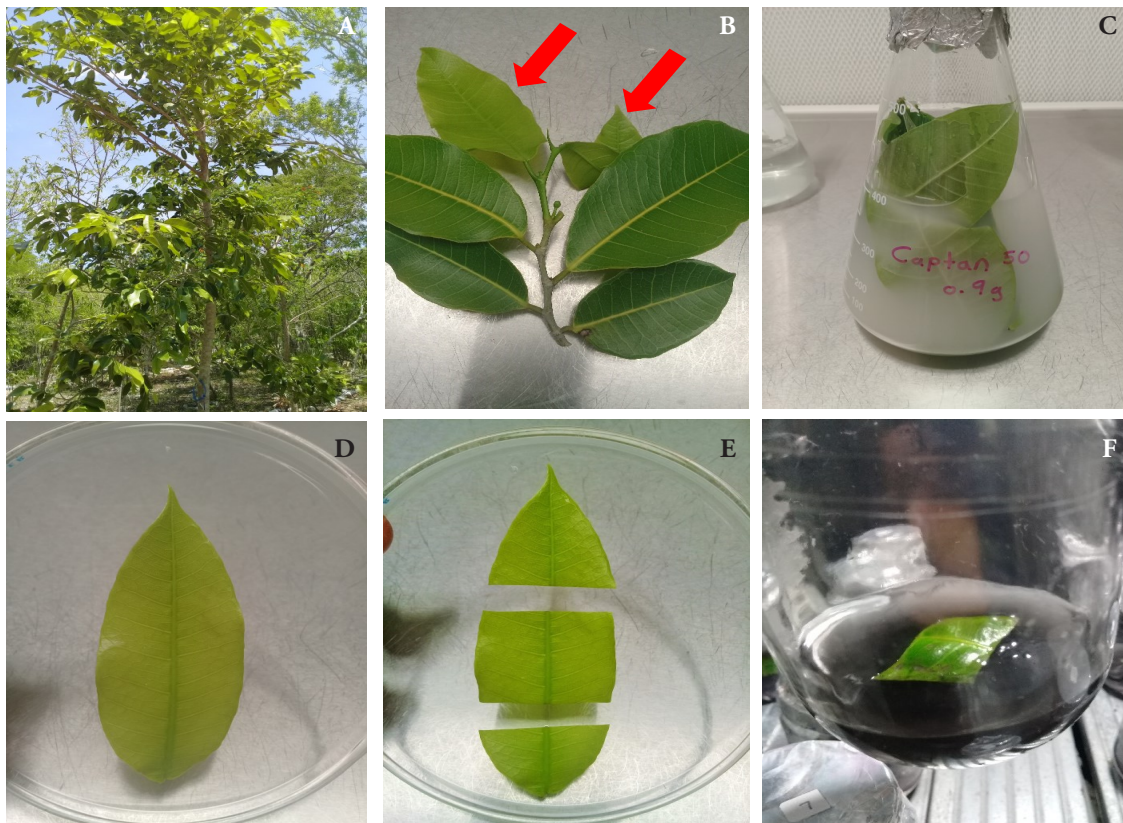


Figure 1. Decontamination method of *B. alicastrum* leaf explants. A) *B. alicastrum* tree. B) Selection of young leaves (red arrows). C) Leaves dipped in biocide solution. D) Leaf previously decontaminated. E) Segmented leaf. F) Leaves in treatments enriched with activated carbon.

Figura 1. Método de descontaminación de explantes de hojas de *B. alicastrum*. A) Árbol de *B. alicastrum*. B) Selección de hojas jóvenes (flechas rojas). C) Hojas sumergidas en solución biocida. D) Hoja previamente descontaminada. E) Hoja segmentada. F) Hojas en tratamientos adicionados con carbón activado.

Treatments for inducing callus genesis

Murashige and Skoog base medium was used to evaluate the callus genesis (Murashige and Skoog, 1962) with 20 treatments, each one with 10 mL L⁻¹ of Gamborg vitamin (Gamborg *et al.*, 1968), at 20 X, 2.2 g L⁻¹ of Gelrite, 30 g L⁻¹ sucrose, 3 g L⁻¹ activated charcoal, 300 mg L⁻¹ polyvinyl pyrrolidone (PVP) and 1.5 mL L⁻¹ Plant Preservative Mixture (PPM, Plant Cell Technology™ Cat N° 100-PPM). Nineteen of the treatments were supplemented with different concentrations and combinations of BAP and 2,4-D, and one treatment did not include growth regulators (Table 1). The pH of the medium was between 5.7-5.8 and sterilized 20 min at 121 °C and a pressure of 0.1177 MPa.

Culture of leaf explants

Two leaf explants were placed on MS medium (Murashige and Skoog, 1962), each of the 20 treatments with activated charcoal. Explants were kept in a culture room at 25 ± 4 °C.

Sub-culture of explants

On day 30, explants were sub-cultured in fresh medium without activated charcoal, same chemical and ambient temperature conditions (29 ± 4 °C) were maintained in the laboratory with a natural photoperiod of 16 h light with an average brightness of 59 Lumens m⁻².

Statistical analysis

In order to measure the parameters in the callus induction, a two-factor experiment with two replicates was carried out twice. There were 20 treatments with different combinations of 2,4-D and BAP concentrations. Data analysis was performed using SPSS (IBM) version 19.

RESULTS AND DISCUSSION

Decontamination process of leaf explants with chlorine

With the decontamination method, more than 80% of leaf explants were obtained without damage by chlorine (Table 2). Therefore, this method is acceptable, and it can be recommended for the removal of microorganisms in the *B. alicastrum* leaves. If the purpose is to adapt to *in vitro* conditions, a schematic method of the decontamination is shown below (Figure 1).

Table 1. Codes for culture treatments of combined growth regulator concentrations used to evaluate callus genesis in leaf explants.

Cuadro 1. Códigos de tratamientos de cultivo por combinaciones de concentraciones de reguladores de crecimiento utilizados para evaluar callogénesis en explantes foliares.

		2,4-D					
		mg L ⁻¹	0	0.5	1	2	3
BAP	0	TA	TB	TC	TD	TE	
	1	TF	TG	TH	TI	TJ	
	1.5	TK	TL	TM	TN	TÑ	
	2	TO	TP	TQ	TR	TS	

proceso de descontaminación, las hojas se sumergieron 30 min en una solución de hipoclorito de sodio al 30%, y se realizaron tres enjuagues con agua destilada durante 1 min cada uno. Al final, cada hoja se cortó por la parte superior e inferior, y se obtuvieron explantes de aproximadamente 1.5 cm² (Figura 1E).

Tratamientos para la inducción de callogénesis

El medio base de Murashige y Skoog se utilizó para evaluar la callogénesis (Murashige y Skoog, 1962) con 20 tratamientos, cada uno con 10 mL L⁻¹ de vitaminas de Gamborg (Gamborg *et al.*, 1968), a 20 X, 2.2 g L⁻¹ de Gelrite, 30 g L⁻¹ de sacarosa, 3 g L⁻¹ de carbón activado, 300 mg L⁻¹ de polivinilpirrolidona (PVP) y 1.5 mL L⁻¹ de Plant Preservative Mixture (PPM, Plant Cell Technology™ Cat N° 100-PPM). Diecinueve de los tratamientos se suplementaron con diferentes concentraciones y combinaciones de BAP y 2,4-D, y un tratamiento no tuvo reguladores de crecimiento (Cuadro 1). El pH del medio estuvo entre 5.7-5.8 y se esterilizó 20 min a 121 °C y presión de 0.1177 MPa.

Cultivo de explantes foliares

Dos explantes foliares se colocaron en medio MS (Murashige y Skoog, 1962), y a los 20 tratamientos se les adicionó carbón activado. Los explantes se mantuvieron en un cuarto de cultivo a 25 ± 4 °C.

Subcultivo de explantes

En el día 30, los explantes se subcultivaron en medio fresco sin carbón activado, se mantuvieron las mismas condiciones químicas y a temperatura ambiente (29 ± 4 °C) en el laboratorio, y un fotoperiodo natural de 16 h de luz con una luminosidad media de 59 Lúmenes m⁻².

Table 2. Percentage leaf explants decontaminated in the decontamination process by chlorine.
Cuadro 2. Porcentaje de explantes de hoja descontaminados con la aplicación de hipoclorito de sodio.

Replicate	Number of leaf explants	Number of leaf explants damaged	Number of leaf healthy explants	Healthy explants (%)
1	80	10	70	87.5
2	80	13	67	83.8
3	80	8	72	90.0

Callus formation from leaf explants

The induction of the callus genesis process was dependent on the combination of specific concentrations of 6-benzylaminopurine (BAP) and 2,4-dichlorophenoxyacetic (2,4-D) because it was shown that callus formation does not occur at any concentration of both growth regulators (Table 3).

Análisis estadístico

Para medir los parámetros en la inducción de callo se realizó por duplicado un experimento de dos factores con dos repeticiones; hubo 20 tratamientos con combinaciones de concentraciones diferentes de 2,4-D y BAP. El análisis de los datos se realizó con el programa SPSS (IBM) versión 19.

Table 3. Induction of callus genesis from *Brosimum alicastrum* leaf explants cultured under different growth regulator combinations. No. of explants per treatment = 2.

Cuadro 3. Inducción de la callogénesis a partir de explantes foliares de *Brosimum alicastrum* cultivados bajo diferentes combinaciones de reguladores de crecimiento. Número de explantes por tratamiento = 2.

Treatment	BAP (mg L ⁻¹)	2,4-D (mg L ⁻¹)	No. of explants with callus genesis		Callus formation (%)
			Replicate 1	Replicate 2	
TA	0	0	0	0	0
TB	0	0.5	0	0	0
TC	0	1	0	0	0
TD	0	2	0	0	0
TE	0	3	0	0	0
TF	1	0	0	0	0
TG	1	0.5	0	0	0
TH	1	1	0	0	0
TI	1	2	0	0	0
TJ	1	3	0	0	0
TK	1.5	0	0	0	0
TL	1.5	0.5	0	0	0
TM	1.5	1	2	2	100
TN	1.5	2	2	2	100
TÑ	1.5	3	0	0	0
TO	2	0	0	0	0
TP	2	0.5	0	0	0
TQ	2	1	0	0	0
TR	2	2	0	0	0
TS	2	3	0	0	0

The formation of callus was favored by treatment TM with 1.5 mg L⁻¹ of BAP and 1 mg L⁻¹ of 2,4-D, and treatment TN with 1.5 mg L⁻¹ of BAP and 2 mg L⁻¹ of 2,4-D (Figure 2).

Statistical analysis (ANOVA) showed that the growth regulators, BAP and 2,4-D (Table 4), have a significant influence on the response of callus induction in foliar explants of *B. alicastrum*, which it was confirmed because there was no callus formation in the absence of growth regulators (Figure 2).

Different concentrations of 2,4-D with 1 mg L⁻¹ BAP did not express callus formation, and the combination of 2 mgL⁻¹ of BAP and 2,4-D showed low callus formation. However, 1.5 mg L⁻¹ of BAP promoted callus formation, which had its greatest effects in the TN and TM treatments (Table 5 and Table 6).

The callus induction response in foliar explants of *B. alicastrum* presented differences with those observed by Riaz *et al.* (2016), that concentrations

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Proceso de descontaminación de explantes

Con el método de descontaminación, más del 80% de los explantes de hoja se obtuvieron sin daños por el hipoclorito de sodio (Cuadro 2). Por lo tanto, este método es aceptable y puede recomendarse para la eliminación de microorganismos presentes en las hojas de *B. alicastrum*. Así, para el establecimiento en condiciones *in vitro*, se presenta un método esquemático de la descontaminación (Figura 1).

Formación de callo a partir de explantes foliares

La inducción del proceso de calogénesis dependió de la combinación de concentraciones específicas de 6-bencilaminopurina (BAP) y 2,4-diclorofenoacético (2,4-D), ya que se demostró que la formación de callo no se produce con cualquier concentración

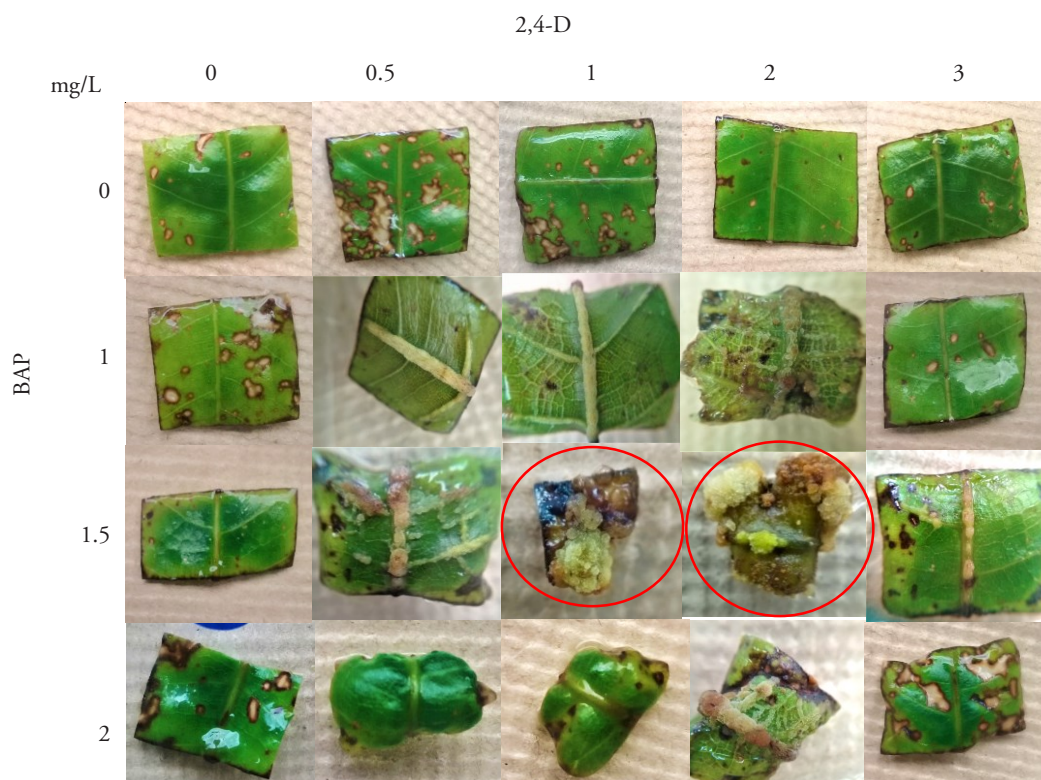


Figure 2. Callus formation of *Brosimum alicastrum* in the presence of BAP and 2,4-D. The explants marked with a red circle are those that formed calli in the presence of a particular combination of specific concentrations of BAP and 2,4-D.

Figura 2. Formación de callos de *Brosimum alicastrum* en presencia de BAP y 2,4-D. Los explantes marcados con un círculo rojo son los que formaron callos en presencia de concentraciones específicas de BAP y 2,4-D en combinación.

Table 4. Statistical analysis of the effect of BAP and 2,4-D in the calli induction.
Cuadro 4. Análisis estadístico del efecto del BAP y del 2,4-D en la inducción de callos.

ANOVA of BAP and D 2,4D regulators on <i>Brosimum alicastrum</i> leaves					
Dependent variable: Callus genesis					
Origin	Square sum Class III	df	Quadratic mean	F	significant
Corrected model	3.600 ^a	7	0.514	10.286	0.000
Intercept	0.800	1	0.800	16.000	0.000
BAP	2.400	3	0.800	16.000	0.000
2,4-D	1.200	4	0.300	6.000	0.000
Error	3.600	72	0.050		
Total	8.000	80			

Table 5. Effect analysis of BAP in the calli induction.
Cuadro 5. Análisis de BAP en la inducción de callos.

BAP effect			
BAP	N	Families	
		1	2
0.00	20	0.000	
1.00	20	0.000	
2.00	20	0.000	
1.50	20		0.400
significant		1.000	1.00

Tukey (DHS) $p \leq 0.05$; based on the harmonic mean of sampled size = 20. ♦ Tukey (DHS) $p \leq 0.05$; basado en la media armónica del tamaño de la muestra = 20.

Table 6. Effect analysis of 2,4-D in the calli induction.
Cuadro 6. Análisis de 2,4-D en la inducción de callos.

2,4-D effect			
2,4-D	N	Families	
		1	2
0.00	16	0.0000	
0.50	16	0.0000	
3.00	16	0.0000	
1.00	16		0.2500
2.00	16		0.2500
significant.		1.000	1.000

Tukey (DHS) $p \leq 0.05$; based on the harmonic mean of sampled size = 16. ♦ Tukey (DHS) $p \leq 0.05$; basado en la media armónica del tamaño de la muestra = 16.

de ambos reguladores del crecimiento (Cuadro 3). La formación de callo fue estimulada por el tratamiento TM con 1.5 mg L⁻¹ de BAP y 1 mg L⁻¹ de 2,4-D; y el tratamiento TN con 1.5 mg L⁻¹ de BAP y 2 mg L⁻¹ de 2,4-D (Figura 2).

El análisis estadístico (ANDEVA) mostró que los reguladores de crecimiento, BAP y 2,4-D (Cuadro 4), tienen una influencia significativa en la respuesta de la inducción de callo en los explantes foliares de *B. alicastrum*, lo cual se confirmó porque no hubo formación de callo en ausencia de reguladores de crecimiento (Figura 2).

Las diferentes concentraciones de 2,4-D con 1 mg L⁻¹ de BAP no expresaron la formación de callo y la combinación de 2 mg L⁻¹ de BAP y 2,4-D mostró una baja formación de callo. Sin embargo, 1.5 mg L⁻¹ de BAP promovió la formación de callo, que tuvo sus mayores efectos en los tratamientos TN y TM (Cuadro 5 y Cuadro 6).

La respuesta de inducción de callo en explantes foliares de *B. alicastrum* presentó diferencias con Riaz *et al.* (2016), quienes observaron que las concentraciones de 2,4-D y BAP promovieron la formación de callo en *Cucurbita moschata*. Este efecto también lo reportaron sobre *Piper betle* (Junairiah *et al.*, 2018). En ambos estudios se determinó que existe una relación entre las concentraciones de los reguladores BAP y 2,4-D con la respuesta temporal en la formación de callo. En *B. alicastrum*, los callos se formaron en unos 20 d y hubo un mayor crecimiento de callos en los tratamientos TN y TM. Esto sugiere que la respuesta morfológica generada por los reguladores 2,4-D y BAP depende de la especie vegetal.

of 2,4-D and BAP promoted callus formation in *Cucurbita moschata*. This effect was also reported on *Piper betle* (Junairiah *et al.*, 2018). In both studies, it was determined that there is a relationship between the concentrations of the regulators BAP and 2,4-D with the time response in callus formation. In *B. alicastrum*, the *calli* were formed in about 20 d and there was higher callus growth in the TN and TM treatments. This suggests that the morphogenic response generated by regulators 2,4-D and BAP depends on plant species.

There are studies of the *callusgenic* response of different plant species in which auxin and cytokinin growth regulators were applied in order to multiply individuals. Thus, Kumlay y Ercisli (2015) evaluated the effect of growth regulators on explants of *Solanum tuberosum* nodal segments and leaf tissue; they found the development of callus genesis in both explants with DM culture medium with 3 mg L⁻¹ of benzyl amino purine (BAP) + 2 mg L⁻¹ naphthalene acetic acid (ANA). However, the best callus production was observed in nodal segments. Both explants tested after callus genesis resulted in bud formation when *calli* were sub-cultured in MS with the presence of BAP or Kinetin.

In our study, there was also callus genesis with a different auxin. Zhu *et al.* (2018) induced callus formation, and subsequent regeneration of plants from young leaves explants of *Paeonia suffruticosa* Andr. The best medium for callus genesis was the MS added with 0.2 mg L⁻¹ of 2,4-dichlorophenoxyacetic acid (2,4-D) + 3 mg L⁻¹ of thidiazuron (TDZ), and *calli* differentiated abundantly when they were sub-cultured in MS + 2 mg L⁻¹ of BAP + 0.2 mg L⁻¹ of ANA + 0.3 mg L⁻¹ of TDZ. This research agrees with that of Zhu *et al.* (2018), who obtained callus from young leaves explants in MS medium with a higher concentration of 2,4-D (2 mg L⁻¹), and with BAP and TDZ replacement.

Sub-culture of *calli* in fresh culture medium

Callus formation started around 20 d after the leaf explant was in TN and TM enriched with activated charcoal. Under these conditions, callus growth was slow until 30 d. However, when *calli* were sub-cultured in TN and TM without presence of activated charcoal, the cell mass started to increase, and reached a remarkable size after two weeks in the medium (Figure 3). This, compared with the

Estudios sobre la respuesta *callogénica* de diferentes especies vegetales existen, en los cuales se aplicaron reguladores de crecimiento de auxinas y citoquininas para multiplicar individuos. Así, Kumlay y Ercisli (2015) evaluaron el efecto de reguladores de crecimiento en explantes de segmentos nodulares y de tejido foliar de *Solanum tuberosum*; encontraron el desarrollo de la calogénesis en ambos explantes con medio de cultivo DM con 3 mg L⁻¹ de bencil amino purina (BAP) + 2 mg L⁻¹ de ácido naftaleno acético (ANA). Sin embargo, la producción mejor de callo se observó en los segmentos nodulares. Ambos explantes probados después de la calogénesis dieron lugar a la formación de yemas cuando los callos se subcultivaron en MS con la presencia de BAP o Kinetina.

En nuestro estudio, también hubo calogénesis con una auxina diferente. Zhu *et al.* (2018) indujeron la formación de callos y la posterior regeneración de plantas a partir de explantes de hojas jóvenes de *Paeonia suffruticosa* Andr. El mejor medio para la calogénesis fue el MS adicionado con 0.2 mg L⁻¹ de ácido 2,4-diclorofenoxyacético (2,4-D) + 3 mg L⁻¹ de tidiazurón (TDZ), y los callos se diferenciaron en modo abundante cuando se subcultivaron en MS + 2 mg L⁻¹ de BAP + 0.2 mg L⁻¹ de ANA + 0.3 mg L⁻¹ de TDZ. Esta investigación coincide con la de Zhu *et al.* (2018), quienes obtuvieron callo a partir de explantes de hojas jóvenes en medio MS con una mayor concentración de 2,4-D (2 mg L⁻¹), y con sustitución de BAP y TDZ.

Subcultivo de *callos* en medio de cultivo fresco

La formación de callo comenzó alrededor de 20 d después de que el explante de hoja estuviera en TN y TM enriquecido con carbón activado. En estas condiciones, el crecimiento del callo fue lento hasta los 30 d. Sin embargo, cuando los callos se subcultivaron en TN y TM sin la presencia de carbón activado, la masa celular comenzó a aumentar y alcanzó un tamaño notable después de dos semanas en el medio (Figura 3). Esto, en comparación con los subcultivos en presencia de carbón activado, en los cuales se produjo un efecto negativo sobre la multiplicación celular en el callo, y la aparición de tejido con presencia de oxidación fenólica.

De acuerdo con Peña-Ramírez *et al.* (2011), los tipos de callos que se formaron son los de clase III y VI (Figura 4). Los de clase VI son callos friables ya que estos se separan con facilidad. Cuando se sub

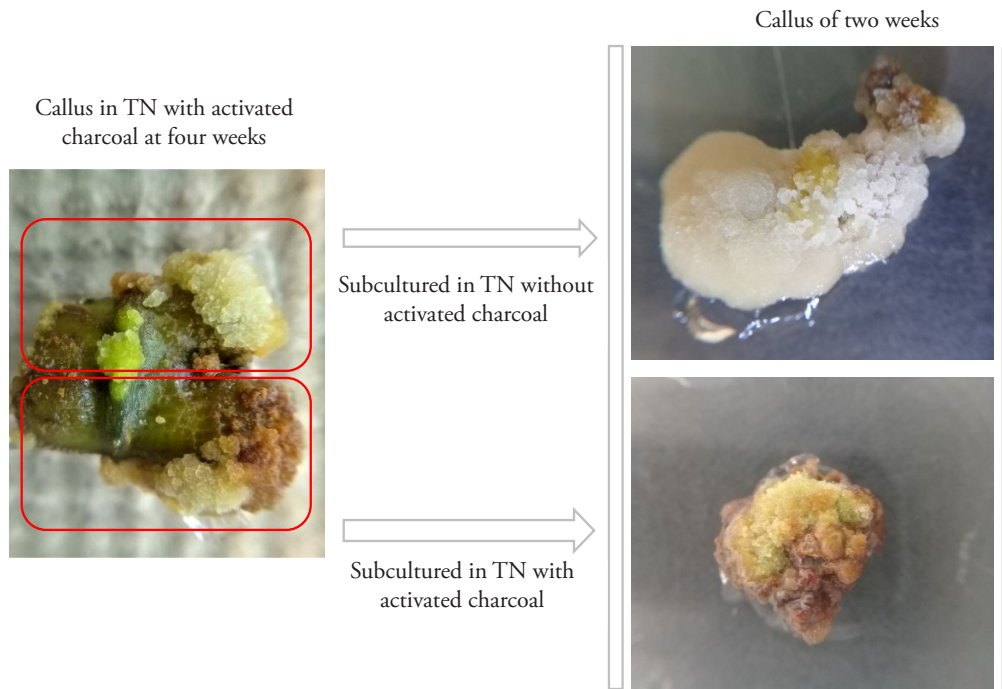


Figure 3. Effect of the presence of activated charcoal in the subculture.
Figura 3. Efecto de la presencia de carbón activado en el subcultivo.

subcultures in the presence of activated charcoal, in which there was a negative effect on the cell multiplication in the callus, and the appearance of phenol-saturated tissue.

According to Peña-Ramírez *et al.* (2011), types of *calli* formed are class III and VI (Figure 4). Those of class VI are friable *calli* since these are separated easily. When they are sub-cultured, they multiply in volume, and after their growth, they separate from their original explants (Figure 4B). While class III are structures that can become crystalline, hyperhydrated, globular shaped with a pale green color, they can also reproduce and may have pre-embryogenic structures (Figure 4E). These characteristics described by those authors match with the *calli* obtained in our study.

Calli growth in continuous presence of activated charcoal showed slow cellular proliferation (Figure 3). This coincides with what was observed in the induction of *calli* of *Oryza sativa* L. (Chutipaijit and Sutjaritvorakul, 2018). These results suggest that presence and concentration of activated charcoal in the culture medium will be a factor to determine the speed of cell proliferation in the callus genesis process in foliar explants of *B. alicastrum*.

cultivan, se multiplican en volumen, y tras su crecimiento, se separan de sus explantes originales (Figura 4B). Mientras que la clase III son estructuras que pueden llegar a ser cristalinas, hiper hidratadas, de forma globular con un color verde pálido, también pueden reproducirse y pueden tener estructuras pro-embriogénicas (Figura 4E). Las características descritas por esos autores coinciden con los callos obtenidos en nuestro estudio.

El crecimiento de callos en presencia continua de carbón activado mostró una proliferación celular lenta (Figura 3). Esto coincide con lo observado en la inducción de callos de *Oryza sativa* L. (Chutipaijit y Sutjaritvorakul, 2018). Estos resultados sugieren que la presencia y concentración de carbón activado en el medio de cultivo será un factor que determinará la velocidad de proliferación celular en el proceso de callogénesis en explantes foliares de *B. alicastrum*.

CONCLUSIONES

El método utilizado para la eliminación de microorganismos en explantes foliares de *Brosimum alicastrum* tuvo una eficiencia del 80% y no causó

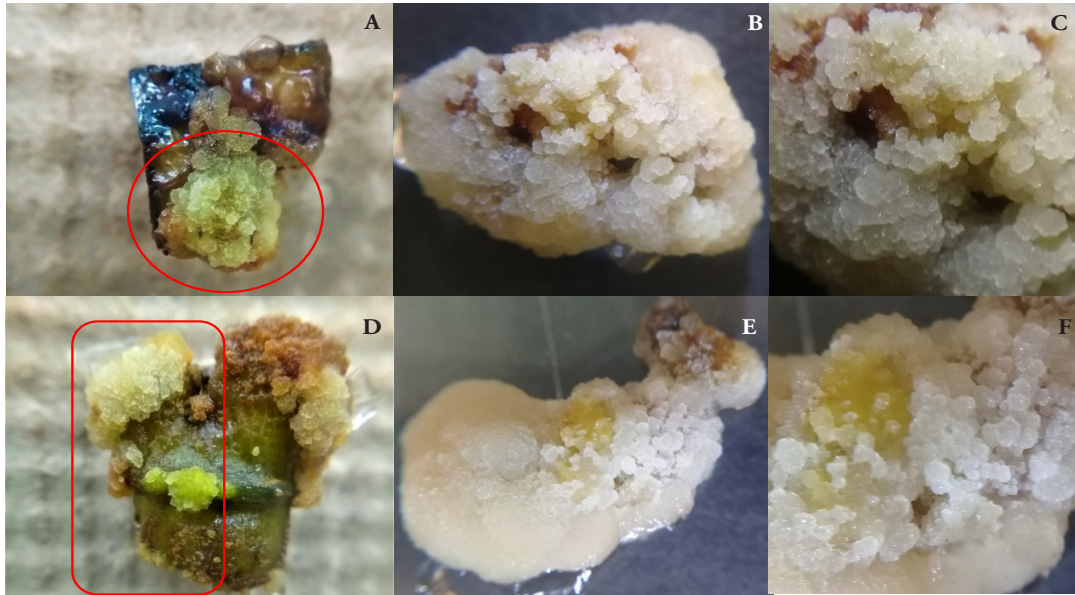


Figure 4. Cell proliferation on the sub-cultured *calli*. A) Callus formed in TM + activated charcoal at 4 weeks before subculture. B) Cellular mass in TM without activated charcoal at 2 weeks after subculture. C) Amplification of image B. D) Callus in TN + activated charcoal at 4 weeks before subculture. E) Cellular mass in TN without activated charcoal at 2 weeks after subculture. F) Amplification of image E. The red parts delimit the parts that were sub-cultured.

Figura 4. Proliferación celular en los *callos* subcultivados. A) Callo formado en TM + carbón activado a las 4 semanas antes del subcultivo. B) Masa celular en TM sin carbón activado a las 2 semanas del subcultivo. C) Ampliación de la imagen B. D) Callo en TN + carbón activado a las 4 semanas antes del subcultivo. E) Masa celular en TN sin carbón activado a las 2 semanas del subcultivo. F) Ampliación de la imagen E. Los trazos rojos delimitan las partes que se sub cultivaron.

CONCLUSIONS

The method used for the elimination of microorganisms in foliar explants of *Brosimum alicastrum* had an efficiency of the 80% and did not cause structural damage. For callus induction the best treatment, that promoted the formation of friable callus with embryogenic potential, was that coded as TN, which integrates Benzylaminopurine and 2,4-Dichlorophenoxyacetic acid, at described concentrations, for 20 days.

For the multiplication in the subculture stage, TN treatment without activated charcoal stimulated the emergence of pre-embryogenic structures at 14 days. Cell proliferation rate was negatively affected by the presence of 3 grams activated charcoal in the culture medium. *In vitro* establishment, and *calli* production of *Brosimum alicastrum* generate an essential advance for subsequent researches in organogenesis or somatic embryogenesis to regenerate this tree.

daños estructurales. Para la inducción de callo, el tratamiento mejor que promovió la formación de callo friable con potencial embriogénico fue el codificado como TN, el cual integra bencilaminopurina y ácido 2,4-diclorofenoxiacético en las concentraciones descritas, durante 20 días.

Para la multiplicación en la etapa de subcultivo, el tratamiento TN sin carbón activado estimuló la generación de estructuras pro-embriogénicas a los 14 días. La tasa de proliferación celular se vio afectada negativamente por la presencia de 3g de carbón activado en el medio de cultivo. El establecimiento *in vitro*, y la producción de callos de *Brosimum alicastrum* generan un avance esencial para investigaciones posteriores en organogénesis o embriogénesis somática para regenerar este árbol.

—Fin de la versión en Español—

-----*-----

LITERATURE CITED

- Cardoso, J. C., L. T. S. Lee Gerald, and J. A. Teixeira da Silva. 2018. Micropropagation in the twenty-first century. *In*: Loyola-Vargas, V. M. and N. Ochoa-Alejo (eds). Plant Cell Culture Protocols. Humana Press. New York, NY. pp: 17-46.
- Chutipajit, S., and T. Sutjaritvorakul. 2018. Application of activated charcoal and nanocarbon to callus induction and plant regeneration in aromatic rice (*Oryza sativa* L). *Chem. Spec. Bioa.* 30:1-8
- Gamborg, O. L., R. A. Miller, and K. Ojima. 1968. Nutrient requirements of suspension cultures of soybean root cells. *Exp. Cell Res.* 50: 151-158.
- Guan, Y., S. G. Li, X. F. Fan, and Z. H. Su. 2016. Application of somatic embryogenesis in woody plants. *Front. Plant Sci.* 7: 938.
- Herman, E. B. 2015. Recent advances in plant tissue culture XXI. Media and techniques for growth, regeneration and storage: 2011–2015. Agritech Consultants Inc., Shrub Oak, NY. 148 p.
- Hernández-González, O., S. Vergara-Yoisura, y A. Larqué-Saavedra. 2015. Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán. *Rev. Mex. Ciencias Forest.* 6: 38-49.
- Junairiah, P., E. S. Wida-Utami, N. Matuzahroh, and L. Sulistyorini. 2018. Callus induction of *Piper betel* Var Nigra using 2, 4 dichlorophenoxyacetic acid and 6-benzil aminopurin. *Biosaintifika.* 10: 588-596.
- Kumlay, A. M., and S. Ercisli. 2015. Callus induction, shoot proliferation and root regeneration of potato (*Solanum tuberosum* L.) stem node and leaf explants under long-day conditions. *Biotech. Biotechnol. Equip.* 29: 1075-1084.
- La Jornada. 2013. El árbol ramón, opción viable de alimentación; complementa al maíz. Julio 24: e1-e2. <https://www.jornada.com.mx/2013/07/24/ciencias/a02n1cie>. (Consulta: diciembre 2019).
- Meiners, M., C. Sánchez, y S. De Blois. 2009. El ramón: Fruto de nuestra cultura y raíz para la conservación. *Biodiversitas* 87: 7-10.
- Murashige, T., and F. Skoog. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plant.* 15: 473-497.
- Peña-Ramírez, Y. J., I. García-Sheseña, Á. Hernández-Espinoza, A. Domínguez-Hernández, F. A. Barredo-Pool, J. A. González-Rodríguez, and M. L. Robert. 2011. Induction of somatic embryogenesis and plant regeneration in the tropical timber tree Spanish red cedar [*Cedrela odorata* L. (Meliaceae)]. *Plant Cell Tissue Org. Cult.* 105: 203-209.
- Phillips, G. C., and G. B. Collins. 1984. Red clover and other forage legumes. *In*: Evans, D. A., W. R. Sharp, P. V. Ammirato, and Y. Yamada (eds). Handbook of Plant Cell Culture. Vol. 2. MacMillan Publ, New York, N. pp: 169–210.
- Phillips G. C., and M. Garda. 2019. Plant tissue culture media and practices: An overview. *In Vitro Cell. Develop. Biol. Plant.* 55: 242–257
- Ramírez-Sánchez, S., D. Ibáñez-Vázquez, M. Gutiérrez-Peña, M. Ortega-Fuentes, L. García-Ponce, y A. Larqué-Saavedra. 2017. El Ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz) una alternativa para la seguridad alimentaria en México. *AgroProductividad* 10: 80-84.
- Riaz S., A. Hussian-Shah, S. Ul-Malook, and Q. Ali. 2016. Study of dichlorophenoxyacetic acid and 6-benzylaminopurine callus development in *Cucurbita moschata*. *Mol. Pl. Br.* 7:1-12.
- Zhu, X., X. Li, W. Ding, S. Jin, and Y. Wang. 2018. Callus induction and plant regeneration from leaves of peony. *Hort. Environ. Biotech.* 59: 575-582.

COMPARATIVE STUDY USING RAW AND TREATED CASSAVA AND LEMON RESIDUES IN THE REMOVAL OF NICKEL (II)

ESTUDIO COMPARATIVO DEL USO DE RESIDUOS DE MANDIOCA Y LIMÓN CRUDOS Y TRATADOS EN LA REMOCIÓN DE NÍQUEL (II)

Candelaria Tejada-Tovar¹, Diofanor Acevedo², Angel Villabona-Ortiz¹, Nórída Pájaro-Gómez¹, María Otero¹

¹Research Group IDAB, Universidad de Cartagena. Cra. 6 #36-100, Cartagena-Colombia. ²Research Group IDAA, Universidad de Cartagena. Cra. 6 #36-100, Cartagena-Colombia (dacevedoc1@unicartagena.edu.co).

ABSTRACT

Increasing pollution of water bodies by heavy metals from different anthropogenic activities, mainly of industrial nature, generates a high level of danger due to accumulation. Within a given time, heavy metals reach high concentrations in living organisms, especially those around sites of discharge. The objective of this research was to evaluate the adsorption capacity of dried lemon (*Citrus limon*) and cassava (*Manihot esculenta* Crantz) peels, raw or treated with citric acid, to remove Ni (II) in synthetic aqueous solution with 100 mg L⁻¹ of metal. To assess adaptation and characterize these bio-adsorbents, biomasses were washed with distilled water. They were dried at 90 °C for 24 h and then ground in a mill. The modification of the cassava and lemon peels was carried out with 0.6 M citric acid; followed by adsorption and kinetic tests that were carried out in a discontinuous system. The biomaterials were characterized by chemical, elemental and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) analysis. We found that both biomasses are composed mostly of carbon and cellulose. The FTIR showed the presence of carboxyl, amino, carbonyl and hydroxyl functional groups, which intervene in the adsorption process. Lemon and cassava peels showed 95.8% adsorption capacity of Ni (II) ions, and 75.69% removal of the contaminants. The best adsorbent particle sizes were 0.5 mm for lemon, and 1 mm for cassava peel, the two biomasses at pH 6. The best fit of the experimental data was Freundlich's model and the pseudo-second-order model best described adsorption kinetics in the Ni (II) removal process. Treatment of the biomasses with citric acid did not render a significant improvement in metal removal. The best conditions

RESUMEN

La contaminación creciente de los cuerpos de agua por metales pesados de diferentes actividades antropogénicas, principalmente de carácter industrial, genera un nivel de peligrosidad alto por acumulación. Estos depósitos registrados en tiempo determinado, alcanzan concentraciones altas en los organismos vivos, en especial en los alrededores de los sitios de descarga. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad de adsorción de cáscaras secas de limón (*Citrus limon*) y mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), crudas o tratadas con ácido cítrico, para remover Ni (II) en solución acuosa sintética con 100 mg L⁻¹ de metal. Para evaluar la adaptación y caracterizar estos bioadsorbentes, se lavaron las biomásas con agua destilada; se secaron a 90 °C durante 24 h y luego se molieron en un molino. La modificación de las cáscaras de mandioca y limón se realizó con ácido cítrico 0.6 M; seguido de pruebas de adsorción y cinética que se llevaron a cabo en un sistema discontinuo. Los biomateriales se caracterizaron por análisis químico, elemental y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). En ambas biomásas se encontró que carbono y celulosa son los compuestos principales. La FTIR mostró la presencia de grupos funcionales de carboxilo, amino, carbonilo e hidroxilo, que intervienen en el proceso de adsorción. Las cáscaras de limón y mandioca mostraron un 95.8% de capacidad de adsorción de iones Ni (II) y 75.69% de eliminación de los contaminantes. Los mejores tamaños de partículas adsorbentes fueron 0.5 mm para la cáscara de limón y 1 mm para la de mandioca, las dos biomásas con pH 6. Los ajustes mejores de los datos experimentales fueron el modelo de Freundlich, y el modelo de pseudo-segundo orden que describió mejor la cinética de adsorción en el proceso de remoción de Ni (II). El tratamiento de las biomásas con ácido cítrico no aportó una mejora significativa en la remoción de metales. Las condiciones mejores para un proceso de adsorción eficiente se lograron al utilizar un tamaño

* Author for correspondence ♦ Autor para correspondencia.
Received: June, 2020. Approved: February, 2021.
Published as ARTICLE in *Agrociencia* 55: 145-158. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2392>

for an efficient adsorption process were achieved using a specific particle size for lemon, 0.5 mm, and 1 mm for cassava residues.

Key words: soil amendments, residual biomass, adsorption, chemical treatment, Freundlich isotherms, *Manihot esculenta*.

INTRODUCTION

Sources of metal contamination are mainly of anthropogenic origin, such as agriculture, metallurgy, energy production, microelectronics, mining, sewage sludge, and waste disposal (Gorimbo *et al.*, 2018). Metallic contaminants can affect aquatic systems through runoff, leaching, and transport through mobile colloids (Genchi *et al.*, 2020). Once metals are cycling in the environment, they pose a serious risk to different ecosystems because of toxicological effects, and ability to migrate to the surface or groundwater (Manjuladevi *et al.*, 2018). Due to their persistence and potential for bioaccumulation and bioaugmentation, the removal of metals from water has become an essential environmental task (Singh and Shukla, 2017).

Nickel is one of the 25 most abundant elements in the crust of Earth, and is used in multiple industrial processes: electroplating, metallizing, painting and dusting, alloying, brass manufacturing, and crude oil extraction processes, among others. Also, in products used daily, such as clothing, batteries, cosmetics, and electronics (Manjuladevi *et al.*, 2018). In high concentrations it is toxic; it can cause dermatitis, pulmonary fibrosis, decreased body weight, cardiovascular disease, liver and kidney damage, gastrointestinal distress, and cancer in humans (Song *et al.*, 2017). Therefore, the World Health Organization recommends that the concentration of Ni (II) in water for human consumption should not exceed 5 mg L⁻¹ (WHO, 2007).

Among the approaches developed for metal removal in water, technologies based on biological methods, riparian bio-filters, bio-adsorbents or both, have emerged as cost-effective alternatives (Tejada-Tovar *et al.*, 2015). Bio-adsorption is a physiochemical process, defined as the removal of toxic substances by biological materials from a liquid or solid solution (Babarinde *et al.*, 2016).

Bio-adsorption applies to all kinds of organic and inorganic contaminants, and it can describe any system where an adsorbate interacts with a bio-

específico de partícula de 0.5 mm para residuos de limón y 1 mm para los residuos de mandioca.

Palabras clave: enmiendas del suelo, biomasa residual, adsorción, tratamiento químico, isoterma de Freundlich, *Manihot esculenta*.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de contaminación por metales son principalmente de origen antropogénico, como la agricultura, la metalurgia, la producción de energía, la microelectrónica, la minería, los lodos de depuradora y la eliminación de desechos (Gorimbo *et al.*, 2018). Los contaminantes metálicos pueden afectar los sistemas acuáticos a través de la escorrentía, la lixiviación y el transporte a través de coloides móviles (Genchi *et al.*, 2020). Una vez que los metales circulan en el medio ambiente, representan un riesgo grave para diferentes ecosistemas debido a los efectos toxicológicos y la capacidad de migrar a la superficie o al agua subterránea (Manjuladevi *et al.*, 2018). Debido a su persistencia y potencial de bioacumulación y bioaumentación, la remoción de metales del agua se ha convertido en una tarea ambiental esencial (Singh y Shukla, 2017).

El níquel es uno de los 25 elementos más abundantes en la corteza terrestre y se utiliza en múltiples procesos industriales: galvanoplastia, metalizado, pintura y espolvoreado, aleaciones, fabricación de látón y procesos de extracción de crudo, entre otros. Además, en productos de uso diario como ropa, baterías, cosméticos y electrónicos (Manjuladevi *et al.*, 2018). En concentraciones altas es tóxico; puede causar dermatitis, fibrosis pulmonar, disminución del peso corporal, enfermedad cardiovascular, daño hepático y renal, malestar gastrointestinal y cáncer en humanos (Song *et al.*, 2017). Por lo tanto, la Organización Mundial de la Salud recomienda que la concentración de Ni (II) en el agua para consumo humano no supere los 5 mg L⁻¹ (WHO, 2007).

Entre los enfoques desarrollados para la remoción de metales en el agua, como alternativas costo eficientes han surgido las tecnologías basadas en métodos biológicos, biofiltros ribereños, bioadsorbentes o ambos (Tejada-Tovar *et al.*, 2015). La bioadsorción es un proceso físico-químico, definido como la eliminación de sustancias tóxicas por materiales biológicos de una solución líquida o sólida (Babarinde *et al.*, 2016).

adsorbent. The resultant is an accumulation at the adsorbate / bio-adsorbent interface, and therefore a reduction in the adsorbate concentration in the solution (Tejada-Tovar *et al.*, 2019). Bio-adsorbents are studied and developed for the effective removal of heavy metals using agricultural, and industrial wastes including tea (Nigam *et al.*, 2019), coffee (Berhe *et al.*, 2015), coconut husk (Johari *et al.*, 2016), palm bagasse (Tejada-Tovar *et al.*, 2018), peat moss, flying ash, cellulose (Periyasamy *et al.*, 2017), orange peel (Rane *et al.*, 2017), and cocoa shells (Obike *et al.*, 2018).

In addition, these bio-adsorbents need additional modifications to increase active binding sites, and make them readily available for adsorption (Okoli *et al.*, 2017). In this context, the main objective of this research was to evaluate the use of waste materials, lemon and cassava dried peel, raw and treated with citric acid as a biomass source for the removal of Nickel (II).

MATERIALS AND METHODS

Adaptation and characterization of bio-adsorbents

In order to characterize the cassava and lemon peels as Ni (II) bio-adsorbents, impurities or other compounds that could affect the adsorption process were removed. The biomass was washed with abundant distilled water, dried in an oven at 90 °C for 24 h, and the size was reduced in a roller mill for 20 min. Then, grading was carried out in a screening machine by selecting the sizes: 0.355, 0.5 and 1 mm. After this pre-treatment, biomass was characterized by elemental and chemical analysis (Table 1). Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) was used to identify functional groups involved in the metal adsorption

La bioadsorción se aplica a todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos, y puede describir cualquier sistema en el que un adsorbato interactúe con un bioadsorbente. Esto da como resultado una acumulación en la interfaz adsorbato / bioadsorbente y por lo tanto, una reducción en la concentración de adsorbato en la solución (Tejada-Tovar *et al.*, 2019). Los bioadsorbentes se estudian y desarrollan para la eliminación efectiva de metales pesados con el uso de desechos agrícolas e industriales, como té (Nigam *et al.*, 2019), café (Berhe *et al.*, 2015), cáscara de coco (Johari *et al.*, 2016), bagazo de palma (Tejada-Tovar *et al.*, 2018), turba, cenizas volantes, celulosa (Periyasamy *et al.*, 2017), piel de naranja (Rane *et al.*, 2017), y cáscaras de cacao (Obike *et al.*, 2018).

Además, estos bioadsorbentes necesitan modificaciones adicionales para aumentar los sitios de unión activos y hacerlos disponibles fácilmente para la adsorción (Okoli *et al.*, 2017). En este contexto, el objetivo principal de esta investigación fue evaluar el uso de materiales de desecho de cáscaras secas de limón y mandioca, crudos y tratados con ácido cítrico como fuente de biomasa para la remoción de níquel (II).

MATERIALES Y MÉTODOS

Adaptación y caracterización de bioadsorbentes

Con el fin de caracterizar las cáscaras de mandioca y limón como bioadsorbentes de Ni (II), se eliminaron impurezas u otros compuestos que pudieran afectar el proceso de adsorción. La biomasa se lavó con agua destilada abundante, se secó en estufa a 90 °C durante 24 h, y se redujo el tamaño en un molino de rodillos durante 20 min. Luego se realizó la clasificación en una máquina de cribado seleccionando los tamaños: 0.355, 0.5 y 1 mm.

Table 1. Chemical analysis of cassava and lemon peel before adsorption.
Cuadro 1. Análisis químico de la cáscara de mandioca y de limón antes de la adsorción.

Component	Cassava	Lemon	Method used
Carbon (%)	36.96	38.48	AOAC 949.14
Hydrogen (%)	3.98	4.98	AOAC 949.14
Nitrogen (%)	0.26	1.21	AOAC 984.13
Sulphur, mg L ⁻¹	0.12	0.09	Digestion – Nephelometry
Ash (%)	1.58	3.68	Thermogravimetry
Pectin (%)	2.84	5.41	Acid digestion – Thermogravimetry
Lignin (%)	2.2	7.22	Photocolorimetry
Cellulose (%)	18.47	18.49	Digestion - Thermogravimetry
Hemicellulose (%)	6.01	6.07	Digestion – thermogravimetry

process; a Shimadzu IRAinfinity-1S spectrophotometer was used with a frequency of 32 scans between 400 and 4000 cm^{-1} .

Treatment of the cassava and lemon peel with citric acid

The treatment was carried out using 0.6 M citric acid, mixing 40 g of the pre-treated biomass with 200 mL of the solution, agitated for 2 h at 3 RCF and 60 °C. Biomaterials were washed with distilled water to remove the acid residue, and dried at 55 °C for 24 h (Romero-Cano *et al.*, 2017).

Adsorption experiments

The synthetic solution of nickel ions at 100 mg L^{-1} was prepared by adding 0.275 g of nickel sulfate into 1 L of deionized water. The adsorption tests were carried out in a batch system at 25 °C in a shaking incubator IN-666 at 5 RCF and 25 °C for 24 h.

Adsorption tests were carried out by placing 0.5 g of bio-adsorbent in contact with 100 mL of solution at a concentration of 100 mg L^{-1} , in order to simulate the concentration of real water measured during the research. Initially, the adsorption experiments were performed with the unmodified biomass to determine the optimal adsorption pH (2, 4 and 6), and particle size (0.355, 0.5 and 1 mm). The final residual Ni (II) concentration was determined using a Buck Scientific Model 210 Variable giant pulse (VGP) Flame atomic absorption spectrometer at 228.8 nm (Tejada-Tovar *et al.*, 2019). The removal efficiency was calculated by equation 1, where respectively C_0 and C_e are defined as the initial and the remaining concentration in mg L^{-1} .

$$\text{Removal yield (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Adsorption kinetic and isotherms

The kinetic modeling of the adsorption process was analyzed by collecting aliquots after 10, 30, 60, 120, 180 and 240 min. Adsorption capacities q_e in mg g^{-1} , were quantified according to Equation 2, where V is the volume of the solution in L, and m is the mass of adsorbent in g.

$$q_e = (C_0 - C_e) \cdot \frac{V}{m} \quad (2)$$

The experimental data were fitted to pseudo-first-order, pseudo-second-order, and Elovich kinetic models, in order to analyze the nickel ion adsorption performance at the surface of the biomass. The setting parameters provide important information

Después de este pretratamiento, la biomasa se sometió a análisis elemental y químico (Cuadro 1). La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) se utilizó para identificar los grupos funcionales implicados en el proceso de adsorción de metales; se utilizó un espectrofotómetro Shimadzu IRAinfinity-1S con una frecuencia de 32 barridos entre 400 y 4000 cm^{-1} .

Tratamiento de la cáscara de mandioca y limón con ácido cítrico

El tratamiento se realizó con 0.6 M de ácido cítrico, con la mezcla de 40 g de la biomasa pretratada y 200 mL de la solución; se agitaron durante 2 h, a RCF y a 60 °C. Los biomateriales se lavaron con agua destilada para eliminar el residuo ácido y se secaron a 55 °C durante 24 h (Romero-Cano *et al.*, 2017).

Experimentos de adsorción

La solución sintética de iones de níquel a 100 mg L^{-1} se preparó al añadir 0.275 g de sulfato de níquel en 1 L de agua desionizada. Las pruebas de adsorción se realizaron en un sistema discontinuo a 25 °C en una incubadora de agitación IN-666 en 5 RCF y 25 °C durante 24 h.

Las pruebas de adsorción se realizaron colocando 0.5 g de bioadsorbente en contacto con 100 mL de solución a una concentración de 100 mg L^{-1} , con el fin de simular la concentración de agua real medida durante la investigación. Al principio, los experimentos de adsorción se realizaron con la biomasa no modificada para determinar el pH de adsorción (2, 4 y 6) y el tamaño de partícula (0.355, 0.5 y 1 mm) óptimos. La concentración residual de Ni (II) final se determinó con un espectrómetro de absorción atómica de pulso variable (VGP) Buck Scientific modelo 210 a 228.8 nm (Tejada-Tovar *et al.*, 2019). La eficiencia de remoción se calculó por medio de la ecuación 1, donde C_0 y C_e respectivamente se definen como la concentración inicial y la restante en mg L^{-1} .

$$\text{Eficiencia de remoción (\%)} = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Cinética de adsorción e isothermas

El modelado cinético del proceso de adsorción se analizó recolectando alícuotas después de 10, 30, 60, 120, 180 y 240 min. Las capacidades de adsorción q_e en mg g^{-1} se cuantificaron según la Ecuación 2, donde V es el volumen de la solución en L y m es la masa de adsorbente en g.

about the rate at which heavy metal ions are removed from the aqueous solution.

The equilibrium of Nickel adsorption on the bio-adsorbent was performed at the best found pH and particle size conditions, by varying the initial concentration in four levels: 25, 50, 75 and 100 mg L⁻¹. The experimental data were adjusted to Langmuir and Freundlich models using the Origin Pro8® software (OriginLab Corporation, Northampton, USA).

RESULTS AND DISCUSSION

Adsorbent characterization

Carbon and cellulose are the components with the highest presence in cassava and lemon peel (Table 1). These cellulose-based polysaccharides act as an ally in adsorption due to their structures, which include alcohols, acids, phenolic hydroxides, aldehydes and ethers groups, which are usually polar compounds, thus improving the ion exchange capacity of biomass (Tejada-Tovar *et al.*, 2019).

Figures 1 and 2 show the results of FTIR for biomasses treated with citric acid before and after Ni (II) ions adsorption. Figures 1 and 2 show the complexity of the used materials, in the number and shape of bands. Significant bands were found in the frequencies 3390.28 cm⁻¹ (NH), 2931.01 cm⁻¹ (C-C), 1652.11 cm⁻¹ (C=C), 1420.81 cm⁻¹ (C-C), 1339.79 cm⁻¹ (NO₂) and 1012.81 cm⁻¹. The presence of the hydroxyl (O-H) functional group between frequencies 3200 and 3650 cm⁻¹ was evident,

$$q_e = (C_0 - C_e) \cdot \frac{V}{m} \quad (2)$$

Los datos experimentales se ajustaron a los modelos cinéticos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y de Elovich para analizar el rendimiento de adsorción de iones de níquel en la superficie de la biomasa. Los parámetros de ajuste proporcionan información importante sobre la velocidad a la cual se eliminan los iones de metales pesados de la solución acuosa.

El equilibrio de adsorción de níquel sobre el bioadsorbente se realizó en las mejores condiciones de pH y tamaño de partícula encontradas, al variar la concentración inicial en cuatro niveles: 25, 50, 75 y 100 mg L⁻¹. Los datos experimentales se ajustaron a los modelos de Langmuir y Freundlich, con el software Origin Pro8® (OriginLab Corporation, Northampton, USA).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del adsorbente

El carbono y la celulosa son los componentes con presencia mayor en la cáscara de mandioca y limón (Cuadro 1). Estos polisacáridos con base de celulosa actúan como aliados en la adsorción debido a sus estructuras que incluyen alcoholes, ácidos, hidróxidos fenólicos, aldehídos y grupos de éteres, los cuales suelen ser compuestos polares que mejoran la capacidad de intercambio iónico de la biomasa (Tejada-Tovar *et al.*, 2019).

La Figura 1 y Figura 2 muestran los resultados de la FTIR para biomasa tratada con ácido cítrico antes y después de la adsorción de iones Ni (II). La

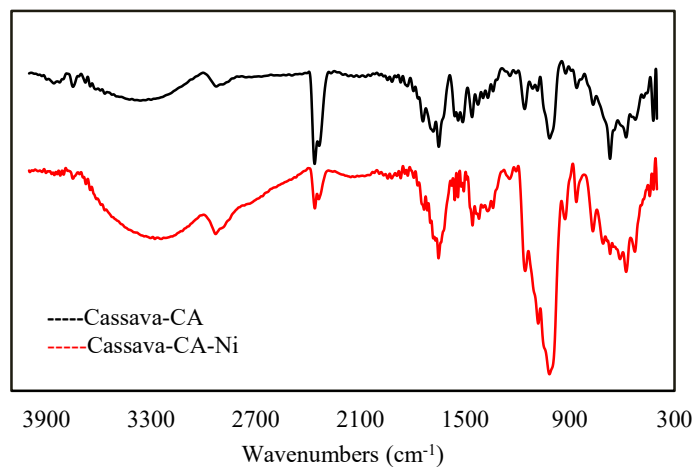


Figure 1. FTIR of treated cassava peel before and after Nickel (II) adsorption. CA: Citric acid.
Figura 1. FTIR de la cáscara de mandioca tratada, antes y después de la adsorción de níquel (II). CA: ácido cítrico.

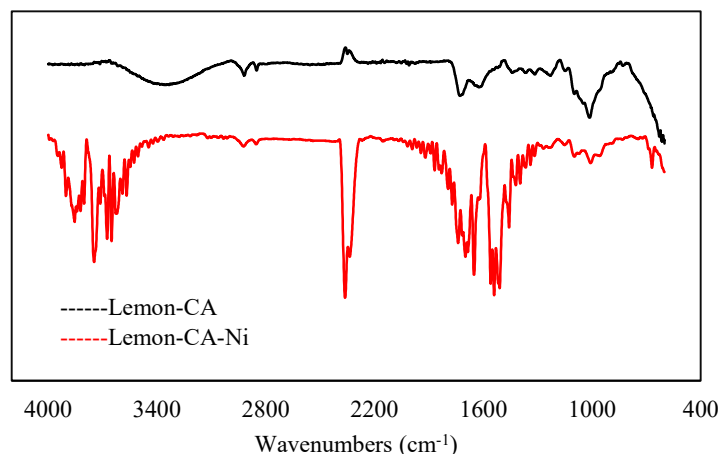


Figure 2. FTIR of treated lemon peel before and after Nickel (II) adsorption. CA: Citric acid.
Figura 2. FTIR de cáscara de limón tratada, antes y después de la adsorción de níquel (II). CA: ácido cítrico.

mainly in the band of 3400 cm^{-1} . A stretching and deformation of the C-H group was observed between the frequencies 2700 and 3000 cm^{-1} , and carboxylic acid corresponding to the band around 2400 cm^{-1} . Around the bands 1600 and 1650 cm^{-1} there was a stretching of the carbonyl group of the carboxylic acids of pectin, cellulose and hemicellulose; while between 900 and 1200 vibrations corresponded to the C-O group of alcohols and phenols, as reported by Mahdi *et al.* (2018).

In biomasses after nickel adsorption, changes in bands were remarkable, showing differences in the vibrations attributed to the incorporation of Nickel (II) in the surface of the biomasses, joined to those different functional groups in them. Changes in intensity and amplitude of bands are due to a variation in the absorption frequency; this indicates the union of the Nickel (II) ions mainly to the OH, CH and CO groups. Between 900 and 1800 cm^{-1} , the bands indicated the presence of aromatic rings in the lignin, and the characteristic stretching of C-O groups, such as aldehydes. The vibrations of the lower frequency bands (between 700 and 1300 cm^{-1}) mostly show interactions of inorganic groups, which are more present after the adsorption process in both cases.

The functional groups C=O and C-O indicated the presence of hemicellulose and lignin in the biomass, as the OH group indicated lignocellulosic molecules, and the C=C group expressed the aromatic

Figura 1 y Figura 2 muestran la complejidad de los materiales utilizados, en el número de bandas presentes y su forma. Bandas significativas se encontraron en las frecuencias 3390.28 cm^{-1} (NH), 2931.01 cm^{-1} (C-C), 1652.11 cm^{-1} (C=C), 1420.81 cm^{-1} (C-C), 1339.79 cm^{-1} (NO_2) y 1012.81 cm^{-1} .

La presencia del grupo funcional hidroxilo (O-H) se evidenció entre las frecuencias 3200 y 3650 cm^{-1} , en particular en la banda de 3400 cm^{-1} . Así como también se observó un estiramiento y deformación del grupo C-H entre las frecuencias 2700 y 3000 cm^{-1} y ácido carboxílico en la banda correspondiente a 2400 cm^{-1} . Entre las bandas 1600 y 1650 cm^{-1} se observó un estiramiento del grupo carbonilo de los ácidos carboxílicos de pectina, celulosa y hemicelulosa; mientras que las vibraciones entre 900 y 1200 correspondieron al grupo C-O de alcoholes y fenoles, de acuerdo con lo reportado por Mahdi *et al.* (2018).

En las biomásas, después de la adsorción de níquel, los cambios en las bandas fueron notables; mostraron diferencias en las vibraciones atribuidas a la incorporación de níquel (II) en la superficie de las biomásas, aunadas a los grupos funcionales diferentes que hay en las mismas. Los cambios en la intensidad y amplitud de las bandas se deben a una variación en la frecuencia de absorción; esto indica la unión de los iones de níquel (II) en especial a los grupos de OH, CH y CO. Entre 900 y 1800 cm^{-1} , las bandas indicaron la presencia de anillos aromáticos en la lignina y el estiramiento característico de los grupos

rings of lignin. These functional active groups which are present in the biomass are the main involved in the process of pollutant adsorption (Singh and Shukla, 2017; Bibaj *et al.*, 2019). In addition, when compared to FTIR after ion adsorption, there was a change around the band 1100 cm^{-1} , which corresponds to the stretching vibrations of the COO ionic carboxylic groups in the infrared (Dai *et al.*, 2018).

After the adsorption of Nickel (II) with the treated lemon peel, the increment of the bands respect to the cassava peel was observed. This suggests that there was a greater presence of metal in the lemon peel. This could be due to the greater number of active absorption centers in the biomaterial, because of the presence of components in its structure such as citronellal, linalool and citral. These compounds are rich in oxygenated functional groups (aldehydes, ketones, esters, and alcohols), as reported by Sudha *et al.* (2015).

Effect of pH and particle size in the adsorption

The effect of solution pH on the adsorption of metal ions in the different biomasses is a very important parameter in these studies. It can make a significant difference in the amount of metal adsorbed, because this factor affects solubility of metal ions and availability of the functional groups present in the cell wall of the biomass (Singh and Shukla, 2017). In Figure 3A a progressive increment

C-O, como los aldehídos. Las vibraciones de las bandas de frecuencias más bajas (entre 700 y 1300 cm^{-1}) muestran en su mayoría interacciones de grupos inorgánicos que están más presentes tras el proceso de adsorción en ambos casos.

Los grupos funcionales C=O y C-O indicaron la presencia de hemicelulosa y lignina en la biomasa, tal como el grupo OH indicó moléculas lignocelulósicas; y el grupo C=C expresó los anillos aromáticos de la lignina. Estos grupos activos funcionales presentes en la biomasa son los principales involucrados en el proceso de adsorción de contaminantes (Singh y Shukla, 2017; Bibaj *et al.*, 2019). Además, cuando se compara con FTIR después de la adsorción de iones, hubo un cambio alrededor de la banda 1100 cm^{-1} , que corresponde a las vibraciones de estiramiento de los grupos iónicos carboxílicos COO en el infrarrojo (Dai *et al.*, 2018).

Después de la adsorción de níquel (II) por la cáscara de limón tratada, se observó el incremento de las bandas respecto a la cáscara de mandioca. Esto sugiere que hubo una mayor presencia de metal en la cáscara de limón. Esto podría deberse al mayor número de centros activos de absorción en el biomaterial, por la presencia de componentes en su estructura como citronelal, linalool y citral. Dichos compuestos son ricos en grupos funcionales oxigenados (aldehídos, cetonas, ésteres y alcoholes), de acuerdo con lo dicho por Sudha *et al.* (2015).

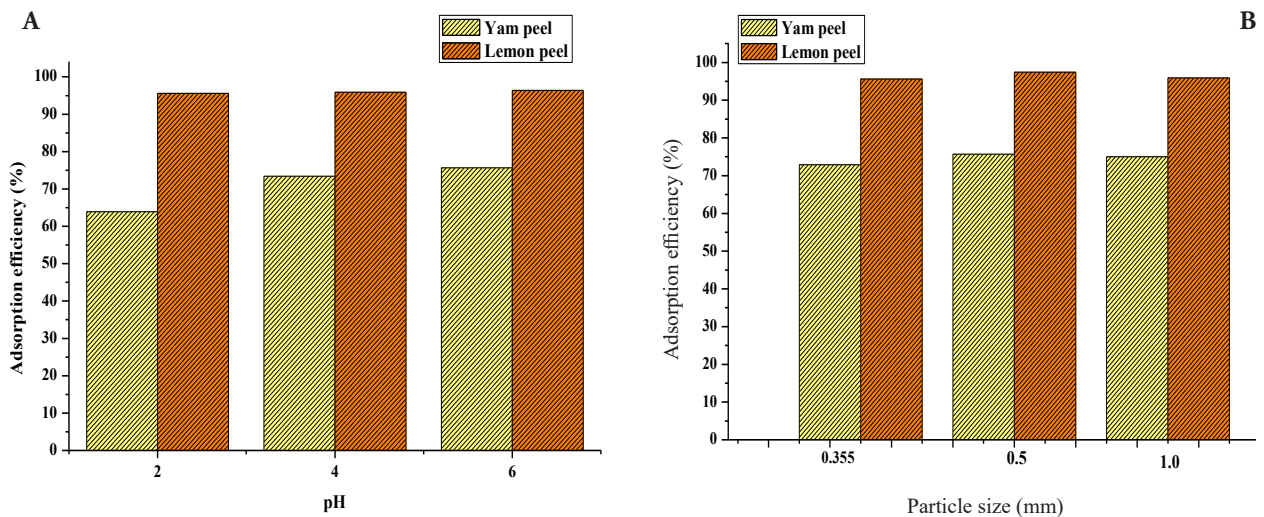


Figure 3. Effect of pH (A) and particle size (B) on the adsorption of Ni (II).
 Figura 3. Efecto del pH (A) y el tamaño de partícula (B) sobre la adsorción de Ni (II).

is shown in the removal of nickel in the whole evaluated pH range (2 to 6), showing a significant increase in the removal yield in the pH interval of 2 to 4, with a less representative trend for pH 4 to 6.

A maximum point of removal (75.69%) was reached at pH 6 by cassava peel. With lemon, the process was similar but the removal rate was 96.4% at pH 6. These results show the clear influence of pH in the metal adsorption. It occurred because, by increasing the pH, OH-concentration on the surface of bio-adsorbent biomass also increased; thus, there was an increment in the adsorption of metal ions.

The results obtained in this study coincide with those by Yargıç *et al.* (2015), who reported that copper removing using tomato husk was favored by pH 8, and up to 92.08% of contaminant was removed. Putra *et al.* (2014) found that the best conditions to remove Cu (II), Pb (II) and Zn (II) were at pH 6 with removals of 3.89, 25.00 and 23.81 mg g⁻¹ with coconut sawdust, 34.48, 90.90 and 35.71 mg g⁻¹ with egg shell, and 3, 65, 21, 28 and 40 mg g⁻¹ with cane bagasse.

In our study, the best results occurred at pH 6 with capacities of 144.6 mg g⁻¹ and 113.53 mg g⁻¹ using lemon and cassava peels, respectively. Our results are superior to those reported with raw biomasses. The superior results obtained with the lemon peel would be due to the presence of components in its structure such as citronellal, linalool and citral, which are rich in oxygenated functional groups (aldehydes, ketones, esters and alcohols) that would provide more active centers of adsorption for the ions (Sudha *et al.*, 2015).

The influence of particle size on the adsorption process at pH 6 is shown in figure 3B. With the most favorable particle size 0.5 mm, the process of adsorption of nickel was 97.4% with lemon and 75.69% with cassava. When the size of particles decreased, the number of active centers per unit of mass was higher, due to the greater surface area of the small particle. Moreover, as the area of the internal surface increases, it also increases the number of pores per unit of mass, thus the amount of adsorbed metal rises. On the contrary, in the bigger, the percentage of adsorption decreased possibly due to an agglomeration of particles.

In order to evaluate the individual interaction and quadratic effects of the variables that influence the efficiency of Ni (II) removal, an analysis of variance (ANOVA) was carried out. The R² adjusted by the

Efecto del pH y el tamaño de partícula en la adsorción

El efecto del pH de la solución sobre la adsorción de iones metálicos en las diferentes biomásas es un parámetro muy importante en estos estudios. Puede marcar una diferencia significativa en la cantidad de metal adsorbido, porque este factor afecta la solubilidad de los iones metálicos y la disponibilidad de los grupos funcionales presentes en la pared celular de la biomasa (Singh y Shukla, 2017). La Figura 3A ilustra un incremento progresivo en la remoción de níquel en todo el intervalo de pH evaluado (2 a 6) y se puede notar un aumento significativo en el rendimiento de remoción en el intervalo de pH de 2 a 4, con una tendencia de forma menos representativa en pH de 4 a 6.

Un punto máximo de remoción (75.69%) se alcanzó en pH 6 con la cáscara de mandioca. Con el limón, el proceso fue similar pero se produjo una tasa de eliminación del 96.4% en pH 6. Estos resultados muestran la influencia clara del pH en la adsorción del metal. El fenómeno ocurrió porque al aumentar el pH, también se incrementó la concentración de OH en la superficie de la biomasa del bioadsorbente; por lo tanto, hubo un incremento en la adsorción de iones metálicos.

Los resultados de este estudio coinciden con los de Yargıç *et al.* (2015), quienes informaron que el proceso de remoción de cobre al usar cáscara de tomate se vio favorecido en pH 8, y se eliminó hasta 92.08% de contaminantes. Putra *et al.* (2014) encontraron que las condiciones mejores para remover Cu (II), Pb (II) y Zn (II) ocurren en pH 6, con valores de remoción de 3.89, 25.00 y 23.81 mg g⁻¹ con aserrín de coco, 34.48, 90.90, y 35.71 mg g⁻¹ con cáscara de huevo y 3, 65, 21, 28 y 40 mg g⁻¹ con bagazo de caña.

En nuestro estudio, los mejores resultados ocurrieron a pH 6, con capacidades de 144.6 mg g⁻¹ y 113.53 mg g⁻¹ cuando respectivamente se utilizaron cáscaras de limón y mandioca. Nuestros resultados son superiores a otros observados con biomásas crudas. Los resultados superiores obtenidos con la cáscara de limón podrían deberse a la presencia de componentes en su estructura, como el citronelal, linalol y citral, los cuales son ricos en grupos funcionales oxigenados (aldehídos, cetonas, ésteres y alcoholes) que proporcionarían centros más activos de adsorción de iones (Sudha *et al.*, 2015).

degrees of freedom (DF) was 0.95 for lemon peel, and 0.83 for cassava peel. F-values are shown in Table 2 for percentage removals of Ni (II); a confidence level of 95% was established for the p-value, so variables with $p < 0.05$ are considered significant (Ahmad and Alrozi, 2010). Thus, pH was the variable with a significant influence on the process of nickel (II) removal (Table 2).

Adsorption kinetics

The adjustment of adsorption kinetics to pseudo-first-order, pseudo-second-order and Elovich models is shown in Figure 4. From the results, a fast adsorption is observed in the initial minutes, removing >90% of the contaminant in the first 30 min when all the adsorbents were used. Biomaterials saturation occurred around 90 min, and equilibrium was observed at 120 min, indicating that the availability of active sites in the biomass is reduced due to the occupation of them by the metal ion (Priyantha *et al.*, 2019).

On the removal of Nickel (II) by cassava husks after treatment, all models successfully adjusted the adsorption process ($R^2 > 0.95$) in all cases, as measured parameters show (Table 3). Ni (II) kinetics on raw and treated lemon peel was described by the pseudo-first-order, pseudo-second-order and Elovich models in all cases ($R^2 > 0.98$).

The fit of pseudo-first-order model indicated that chemical forces are involved in adsorption, and that metal uptake occurs at a single active site of the bioadsorbent (Garba *et al.*, 2016). The fit to the pseudo-second-order model, indicated that ions adsorption occurs by chemical reaction forming

La influencia del tamaño de partícula en el proceso de adsorción con pH 6 se muestra en la figura 3B. Con el tamaño de partícula más favorable (0.5 mm) el proceso de adsorción de níquel fue de 97.4% con cáscara de limón y 75.69% con cáscara de mandioca. Cuando el tamaño de las partículas disminuyó, el número de centros activos por unidad de masa fue mayor, debido al área superficial mayor de la partícula pequeña. Además, una área superficial interna mayor aumenta la cantidad de poros por unidad de masa, y cuanto mayor es la cantidad de poros por unidad de masa, mayor es la cantidad de metal adsorbido. Por el contrario, en el tamaño mayor, el porcentaje de adsorción disminuyó posiblemente debido a la aglomeración de las partículas.

Para evaluar la interacción individual y los efectos cuadráticos de las variables que influyen en la eficiencia de la remoción de Ni (II), se realizó un análisis de varianza (ANDEVA). El R^2 ajustado por los grados de libertad (DF) fue de 0.95 para la cáscara de limón y 0.83 para la cáscara de mandioca. Los valores F se incluyen en el Cuadro 2 para porcentajes de remoción de Ni (II); se estableció un nivel de confianza del 95% para el valor de p, por lo tanto, las variables con $p < 0.05$ se consideran significativas (Ahmad y Alrozi, 2010). Así, el pH fue la variable con influencia estadística significativa en el proceso de remoción de níquel (II) (Cuadro 2).

Cinética de adsorción

El ajuste de la cinética de adsorción a los modelos de pseudo-primer orden, pseudo-segundo orden y Elovich se muestra en la Figura 4. A partir de los resultados, se observa una adsorción rápida en los

Table 2. ANOVA for Nickel removal efficiency of cassava and lemon peel.
Cuadro 2. ANDEVA de la eficiencia de remoción de níquel con las cáscaras de mandioca y limón.

Variables	Cassava peel				Lemon peel			
	Sum of squares	DF	F-value	p-Value	Sum of squares	DF	F-value	p-Value
A:pH	110.339	1	9.43	0.050	2.100	1	10.86	0.0459
B:Particle size	0.07	1	0.01	0.944	0.0704	1	0.36	0.588
AA	10.020	1	0.86	0.423	2.240	1	11.58	0.0424
AB	0.116	1	0.01	0.927	0.003	1	0.01	0.9167
BB	19.2614	1	1.65	0.289	1.254	1	6.48	0.0843
Total error	35.106	3			0.580	3		
Corr.total	174.91	8			6.247	8		

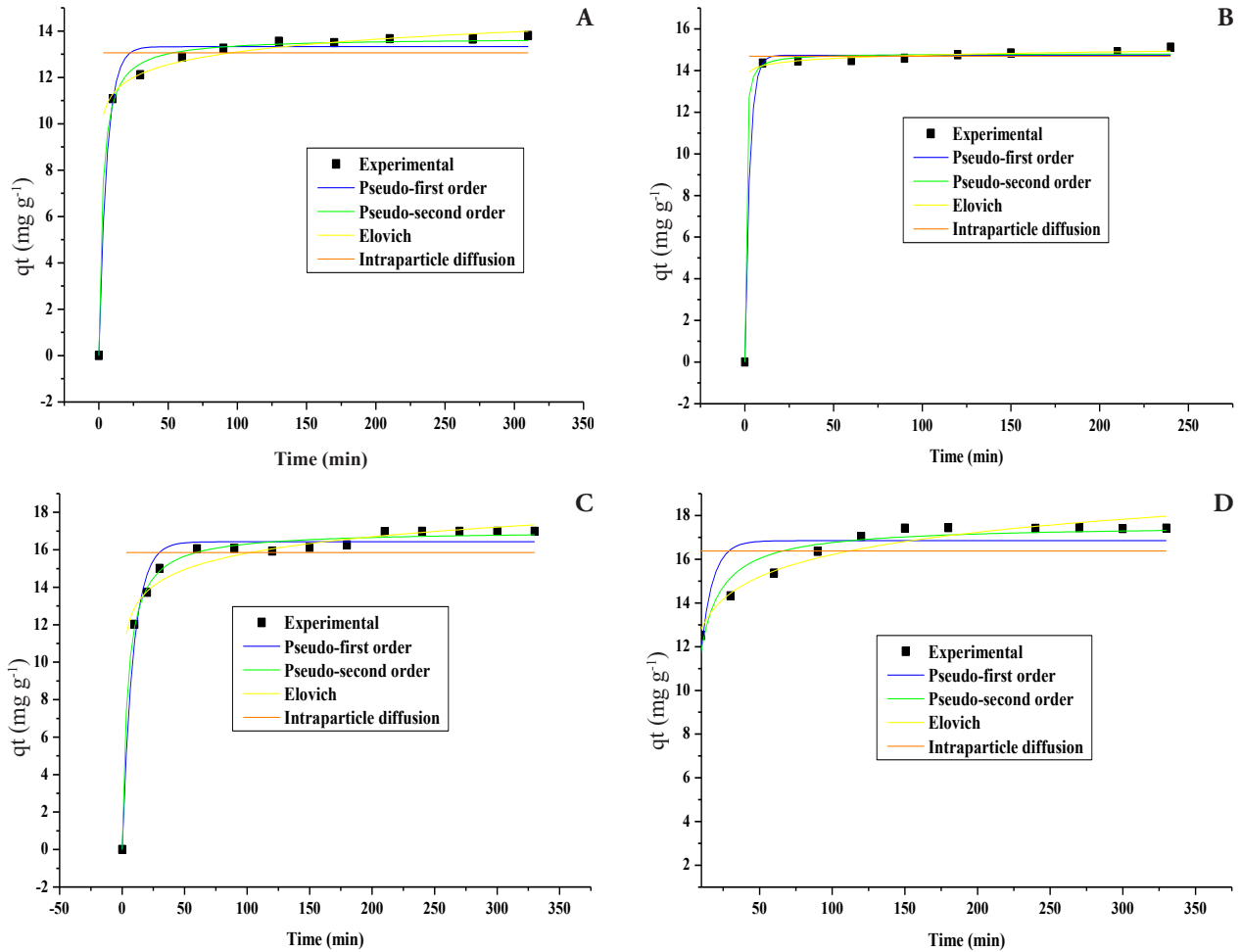


Figure 4. Adjustment of the kinetic Ni adsorption models with (A) raw cassava peel, (B) treated cassava peel, (C) raw lemon peel, and (D) treated lemon peel.

Figura 4. Ajuste de los modelos cinéticos de adsorción de Ni con (A) cáscara de mandioca cruda, (B) cáscara de mandioca tratada, (C) cáscara de limón cruda y (D) cáscara de limón tratada.

Table 3. Nickel adsorption kinetics parameters.

Cuadro 3. Parámetros de la cinética de adsorción de níquel.

Kinetic model	Parameters	Values			
		Cassava	Treated cassava	Lemon	Treated lemon
Pseudo-first-order	q_{e1} (mg g ⁻¹)	13.324	14.732	16.429	16.848
	k_1 (min ⁻¹)	0.1735	0.366	0.113	0.124
	R ²	0.986	0.998	0.981	0.963
Pseudo-second-order	q_{e2} (mg g ⁻¹)	13.707	14.817	17.020	17.566
	k_2 (min ⁻¹)	0.028	0.171	0.014	0.012
	R ²	0.997	0.999	0.996	0.990
Elovich	α (mg g ⁻¹ min ⁻¹)	1.267	4.559	0.791	0.679
	β (g mg ⁻¹)	127356.711	3.34708E26	3444.697	895.819
	R ²	0.998	0.999	0.989	0.994
Intraparticle diffusion	k_{e3}	13.057	14.684	15.855	16.375
	R ²	0.959	0.998	0.897	0.901

chelates with two active sites in the biomass (Obike *et al.*, 2018).

According to the parameters q_e of both models, the treated biomasses showed a slightly higher performance than natural biomasses, which coincides with Priyantha *et al.* (2019) who used acetic acid treated peat shells. The α parameter of Elovich model was higher in the treated cassava peel than in the raw one, which suggests that the reduction in the adsorption rate with the increment of the adsorbed amount is higher in the treated biomass than in the raw biomass, according to Marques *et al.*, (2019) who used *Attalea funifera* fibers. The high value of α suggests that the adsorption occurred quickly in the initial minutes, while the high value recorded for β indicates that in this system, desorption can be easily achieved, facilitating the reuse of the biomaterial and the recovery of the metal (Marques *et al.*, 2019).

The value of the parameter k_3 of the intraparticle diffusion model suggests that the diffusion velocity during the process was high, and the graph did not cut the origin. Therefore, the diffusion is not the limiting step, and the process occur in several steps: in the first minutes there is surface adsorption or nickel molecules transport from the massive phase to the adsorbing surface. Then, the intraparticle diffusion of the ions in the pores of the adsorbent particles occur. Finally, the equilibrium stage showed gradual adsorption, dominated by porous diffusion, producing a multilayer process.

Thus, diffusion between particles participates in the adsorption process, but it cannot control the general adsorption of the metal molecules. More than one mechanism drives the adsorption process (El-Bahy and El-Bahy, 2017). The speed constants of adsorption of the pseudo-first-order and pseudo-second-order models express that the process of adsorption occurs more rapidly on the peel of cassava treated with citric acid.

Adsorption isotherms

The model of isotherms that best fitted the experimental adsorption data of Ni (II) ion in residual biomass of lemon and cassava, raw or treated with citric acid was the Freundlich model (Table 4). Then, we can say that the adsorption process occurs through the formation of multilayers from the surface towards the interior of the pores of the

minutos iniciales que eliminó >90% del contaminante en los primeros 30 min, cuando se utilizaron todos los adsorbentes. La saturación de los biomateriales ocurrió a los 90 min aproximadamente y el equilibrio se observó a los 120 min; lo cual indica que la disponibilidad de sitios activos en la biomasa se reduce debido a la ocupación de los mismos por el ion metálico (Priyantha *et al.*, 2019).

En la remoción de níquel (II) por las cáscaras de mandioca después del tratamiento, todos los modelos ajustaron exitosamente el proceso de adsorción ($R^2 > 0.95$) en todos los casos, como lo muestran los parámetros medidos (Cuadro 3). La cinética de Ni (II) en la cáscara de limón cruda y tratada se describió mediante los modelos de pseudo primer orden, pseudo segundo orden y Elovich en todos los casos ($R^2 > 0.98$).

El ajuste del modelo de pseudo-primer orden indicó que fuerzas químicas están involucradas en la adsorción y que la absorción de metales ocurre en un solo sitio activo del bioadsorbente (Garba *et al.*, 2016). El ajuste del modelo de pseudo-segundo orden indicó que la adsorción de iones ocurre por reacción química formando quelatos con dos sitios activos presentes en la biomasa (Obike *et al.*, 2018).

De acuerdo con los parámetros q_e de ambos modelos, las biomazas tratadas mostraron un comportamiento ligeramente superior a las biomazas naturales, lo cual coincide con Priyantha *et al.* (2019) quienes utilizaron costras de turba tratadas con ácido acético. El parámetro α del modelo de Elovich fue mayor en la cáscara de mandioca tratada que en la natural; esto sugiere que la reducción en la tasa de adsorción con el incremento de la cantidad adsorbida es mayor en la biomasa tratada que en la cruda, de acuerdo con Marques *et al.*, (2019) quienes usaron fibras de *Attalea funifera*. El valor alto de α sugiere que la adsorción ocurrió rápidamente en los minutos iniciales, mientras que el valor alto registrado para β indica que en este sistema se puede lograr desorción fácilmente; hecho que facilita el reúso del biomaterial y la recuperación del metal (Marques *et al.*, 2019).

El valor del parámetro k_3 del modelo de difusión intra partícula sugiere que la velocidad de difusión durante el proceso fue alta y la gráfica no recortó el origen. Por lo tanto, la difusión no es el paso limitante y el proceso tiene lugar en varios pasos: en los primeros minutos se produce la adsorción superficial o el transporte de moléculas de níquel desde

Table 4. Isotherms study on the adsorption of Ni (II) in lemon and cassava peel.
Cuadro 4. Estudio de isothermas para la adsorción de Ni (II) en cáscaras de limón y mandioca.

Parameters	Langmuir			
	Lemon - Ni	Lemon CA - Ni	Cassava - Ni	Cassava CA - Ni
q_m	7.4	6.43984639	8.51295	5.98
b	9245366.12	9245366.123	70.849505	46.21
R^2	0.12	0.3803	0.3871	0.46
Parameters	Freundlich			
	Lemon - Ni	Lemon CA - Ni	Cassava - Ni	Cassava CA - Ni
K_F	0.53	0.401534	0.14	0.43
n	1.30	1.6890539	0.73	0.64
R^2	0.91	0.8592	0.92	0.90

adsorbent, with different activation energies due to the heterogeneity of the active centers, as reported by Gorimbo *et al.*, (2018) and Bibaj *et al.*, (2019). Therefore, the surface of the biomasses is assumed to be heterogeneous and during the adsorption process multilayers are formed on the surface of the biomaterials (Bibaj *et al.*, 2019). Then, active sites that could be adsorption sites are occupied at first by strong bonds, but this strength decreases as Ni (II) ions occupy those active sites.

Treated biomass showed lower capacity at the equilibrium, which might be due to a carboxylation that would show the chemical modification of biomass; however, it was not completed, and there was no addition of these groups into the biomaterial. Therefore, other biomaterials modifications should be performed in order to insert carboxyl and hydroxyl groups to those structures, such as modification by sulfuric acid, nitric acid or strong bases (NaOH or KOH). The k_f parameter is higher when the dye is adsorbed onto the treated biomass, indicating greater selectivity to the metal. The values of Freundlich constant n (Table 3), are in the range 1-10 for raw and treated cassava peels, indicating that the chemical bonds formed between ions and the adsorbent are strong, which favors the formation of different layers in the adsorbent (Long *et al.*, 2018).

CONCLUSIONS

Both biomasses are composed mostly of carbon and cellulose. Analyses showed the presence of

la fase masiva hasta la superficie adsorbente. Luego, tiene lugar la difusión intra partícula de los iones en los poros de las partículas adsorbentes. Por último, la etapa de equilibrio mostró una adsorción gradual dominada por la difusión porosa que actúa como un proceso en capas múltiples.

Por lo tanto, la difusión entre partículas participa en el proceso de adsorción, pero no puede controlar la adsorción general de las moléculas metálicas. Más de un mecanismo impulsa el proceso de adsorción (El-Bahy y El-Bahy, 2017). Las constantes de velocidad de adsorción de los modelos de pseudo-primer orden y pseudo-segundo orden expresan que el proceso de adsorción ocurre más rápidamente en la cáscara de mandioca tratada con ácido cítrico.

Isotermas de adsorción

El modelo de isotermas que se ajustó mejor a los datos experimentales de adsorción del ion Ni (II) en la biomasa residual de limón y mandioca, cruda o tratada con ácido cítrico fue el modelo de Freundlich (Cuadro 4). Entonces, se puede decir que el proceso de adsorción ocurre a través de la formación de capas múltiples desde la superficie hacia el interior de los poros del adsorbente, con energías de activación diferentes debido a la heterogeneidad de los centros activos, como lo documentaron Gorimbo *et al.*, (2018) y Bibaj *et al.*, (2019). Por eso podemos suponer que la superficie de las biomasas es heterogénea y que durante el proceso de adsorción se forman capas múltiples en la superficie de los biomateriales (Bibaj *et al.*,

carboxyl, amino, carbonyl and hydroxyl functional groups, which intervene in the adsorption process. Ni (II) adsorption yields were good with lemon (96%) and cassava (76%) peels, proven successful in the adsorption of metal from synthetic water.

The most appropriate conditions for the adsorption process were achieved using a particle size of 0.5 mm for lemon and 1 mm for cassava ground peels at pH 6. The pseudo-second-order model described best the adsorption kinetics of the metal, as did the Freundlich isotherms.

LITERATURE CITED

- Babarinde, A., K. Ogundipe, and K. T. Sangosanya. 2016. Comparative study on the biosorption of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) using Lemon grass (*Cymbopogon citratus*): Kinetics, isotherms and thermodynamics. *Chem. Int.* 2: 89–102.
- Berhe, S., D. Ayele, A. Tadesse, and A. Mulu. 2015. Adsorption efficiency of coffee husk for removal of lead (II) from industrial effluents: Equilibrium and kinetic study. *Intern. J. Sci. Res. Pub.* 5: 753-859.
- Bibaj, E., K. Lysigaki, J. W. Nolan, A. Seyedsalehi, E. A. Deliyanni, A. C. Mitropoulos, and G. Z. Kyzas. 2019a. Activated carbons from banana peels for the removal of nickel ions. *Inter. J. Environ. Sci. Tech.* 16: 667-680.
- Dai, Y., Q. Sun, W. Wang, L. Lu, M. Liu, J. Li, S. Yang, Y. Sun, K. Zhang, W. Zheng, Z. Hu, Y. Yang, Y. Gao, Y. Chen, X. Zhang, F. Gao, and Y. Zhang. 2018. Utilizations of agricultural waste as adsorbent for the removal of contaminants: A review. *Chemosphere.* 211: 235–253.
- El-Bahy, S. M., and Z. M. El-Bahy. 2017. Immobilization of 2-amino pyridine onto poly (acrylonitrile-co-N, N-methylenebisacrylamide) nanoparticles for the removal of Hg (II), Cd (II) and Cr (III): Batch and column techniques. *J. Environ. Chem. Eng.* 5: 3560-3571.
- Garba, Z. N., N. I. Ugbaga, and A. K. Abdullahi. 2016. Evaluation of optimum adsorption conditions for Ni (II) and Cd (II) removal from aqueous solution by modified plantain peels (MPP). *Beni-Suef Univ. J. Basic Appl Sci.* 5: 170-179.
- Genchi, G., A. Carocci, G. Lauria, M. S. Sinicropi, and A. Catalano. 2020. Nickel: Human health and environmental toxicology. *Inter. J. Environ. Res. Public Health.* 17: 679.
- Gorimbo, J., B. Taenzana, A. A. Muleja, A. T. Kuvarega, and L. L. Jewell. 2018. Adsorption of cadmium, nickel and lead ions: equilibrium, kinetic and selectivity studies on treated clinoptilolites from the USA and RSA. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 25: 30962–30978.
- Johari, K., N. Saman, S. T. Song, C. S. Chin, H. Kong, and H. Mat. 2016. Adsorption enhancement of elemental mercury by various surface treated coconut husk as eco-friendly low-cost adsorbents. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* 109: 45–52.
- Long, J., X. Huang, X. Fan, Y. Peng, and J. Xia. 2018. Effective adsorption of nickel (II) with *Ulva lactuca* dried biomass: isotherms, kinetics and mechanisms. *Water Sci. Tech.* 78: 156-164.

2019). Entonces, los sitios activos que podrían ser sitios de adsorción se ocupan en principio por enlaces fuertes, pero esta fuerza disminuye a medida que los iones Ni (II) ocupan estos sitios activos.

La biomasa tratada mostró capacidad menor en el punto de equilibrio, lo cual podría deberse a una carboxilación que mostraría la modificación química de la biomasa; sin embargo, no se completó y estos grupos no se agregaron al biomaterial. Por lo tanto, se deben realizar otras modificaciones de biomateriales para insertar grupos carboxilo e hidroxilo en esas estructuras, como la modificación por ácido sulfúrico, ácido nítrico o bases fuertes (NaOH o KOH). El parámetro k_f es mayor cuando el tinte se adsorbe sobre la biomasa tratada, lo que indica una selectividad mayor por el metal. Los valores de la constante n de Freundlich (Cuadro 3) se encontraron en el intervalo 1-10 para las cáscaras de mandioca cruda y tratada; esto indica que los enlaces químicos formados entre los iones y el adsorbente son fuertes, lo cual favorece la formación de capas diferentes en el adsorbente (Long *et al.*, 2018).

CONCLUSIONES

Las dos biomásas están compuestas principalmente por carbono y celulosa. Los análisis mostraron la presencia de grupos funcionales de carboxilo, amino, carbonilo e hidroxilo que intervienen en el proceso de adsorción. Buenos rendimientos de adsorción de Ni (II) ocurrieron con el uso de cáscaras de limón (96%) y mandioca (76%); biomateriales que han demostrado éxito en la adsorción de metales del agua sintética.

Las condiciones más adecuadas para el proceso de adsorción se lograron con un tamaño de partículas de cáscara molida de 0.5 mm para limón y 1 mm para mandioca, en pH de 6. El modelo de pseudo-segundo orden describió mejor la cinética de adsorción del metal, así como lo hicieron las isothermas de Freundlich.

—Fin de la versión en Español—



- Mahdi, Z., Q. J. Yu, and A. El Hanandeh. 2018. Investigation of the kinetics and mechanisms of nickel and copper ions adsorption from aqueous solutions by date seed derived biochar. *J. Environ. Chem. Eng.* 6: 1171–1181.
- Manjuladevi, M., R. Anitha, and S. Manonmani. 2018. Kinetic study on adsorption of Cr (VI), Ni (II), Cd (II) and Pb (II) ions from aqueous solutions using activated carbon prepared from *Cucumis melo* peel. *Appl. Water Sci.* 8: 36.
- Marques, B. S., T. S. Frantz, T. R. S. A. C. Junior, L. A. de Almeida Pinto, and G. L. Dotto. 2019. Adsorption of a textile dye onto piaçava fibers: kinetic, equilibrium, thermodynamics, and application in simulated effluents. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26: 28584–28592.
- Nigam, M., S. Rajoriya, S. R. Singh, and P. Kumar. 2019. Adsorption of Cr (VI) ion from tannery wastewater on tea waste: kinetics, equilibrium and thermodynamics studies. *J. Environ. Chem. Eng.* 7: 103188.
- Obike, A. I., J. C. Igwe, C. N. Emeruwa, and K. J. Uwakwe. 2018. Equilibrium and kinetic studies of Cu (II), Cd (II), Pb (II) and Fe (II) adsorption from aqueous solution using cocoa (*Theobroma cacao*) pod husk. *J. Appl. Sci. Environ. Manag.* 22: 182–190.
- Okoli, C. P., P. N. Diagboya, I. O. Anigbogu, B. I. Olu-Owolabi, and K. O. Adebowale. 2017. Competitive biosorption of Pb(II) and Cd(II) ions from aqueous solutions using chemically treated moss biomass (*Barbula lambarenensis*). *Environ Earth Sci.* Springer Berlin Heidelberg. 76: 1–10.
- Periyasamy, S., V. Gopalakannan, and N. Viswanathan. 2017. Fabrication of magnetic particles imprinted cellulose based biocomposites for chromium(VI) removal. *Carbohydr. Polym.* 174: 352–259.
- Priyanthaa, N., L. B. L. Limc, S. Mallikarathnaa, and T. P. K. Kulasooriyaa. 2019. Enhanced removal of Ni (II) by acetic acid-modified peat. *Desal. Water Treat.* 137: 162–173.
- Putra, W. P., A. Kamari, S. N. M. Yusoff, C. F. Ishak, A. Mohamed, N. Hashim, and I. M. Isa. 2014. Biosorption of Cu(II), Pb(II) and Zn(II) ions from aqueous solutions using selected waste materials: Adsorption and characterisation studies. *J. Encapsulation Adsorpt. Sci.* 4: 25–35.
- Rane, N. M., S. P. Shewale, S. V. Admane, and R. S. Sapkal. 2017. Adsorption of hexavalent chromium by using sweet lime and orange peel powder. Edited by: Bharat A. Bhanvase, Rajendra P. Ugwekar, Raju B. Mankar. *Novel Water Treatment and Separation Methods.* Apple Academic Press. pp: 101–114.
- Romero-Cano, L. A., H. García-Rosero, L. V. Gonzalez-Gutierrez, L. A. Baldenegro-Pérez, and S. R. Carrasco-Marín. 2017. Functionalized adsorbents prepared from fruit peels: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies for copper adsorption in aqueous solution. *J. Cleaner Prod.* 162: 195–204.
- Singh, S., and S. R. Shukla. 2017. Theoretical studies on adsorption of Ni(II) from aqueous solution using *Citrus limetta* peels. *Environ. Prog. Sustainable Energy.* 36: 864–872.
- Song, X., S. S. F. Kenston, L. Kong, and J. Zhao, 2017. Molecular mechanisms of nickel induced neurotoxicity and chemoprevention. *Toxicology.* 392: 47–54.
- Sudha, R., K. Srinivasan, and P. Premkumar. 2015. Removal of nickel (II) from aqueous solution using Citrus Limettioides peel and seed carbon. *Ecotoxic. Environ. Saf.* 117: 115–123.
- Tejada-Tovar, C., A. Herrera-Barros, y J. Nuñez-Zarur. 2015. Adsorción competitiva de Ni (II) y Pb (II) sobre materiales residuales lignocelulósicos. *Invest. Andina.* 17: 1355–1367.
- Tejada-Tovar, C., A. Villabona, L. Acevedo, E. López, and D. Acevedo. 2018. Study of the effect of temperature in the removal of Ni (II) on African Palm bagasse (*Elaeis guineensis*). *Int. J. ChemTech Res.* 11: 32–44.
- Tejada-Tovar, C., A. Gonzalez-Delgado, and A. Villabona-Ortiz. 2019. Characterization of residual biomasses and its application for the removal of lead ions from aqueous solution. *Appl. Sci.* 9: 4486.
- Tejada-Tovar, C., E. Ruiz-Paternina, A. Herrera-Barros, and R. Ortega-Toro. 2019. Characterization and use of agroindustrial by-products in the removal of metal ions in aqueous solution. *Journal Tek.* 8: 151–158.
- WHO (World Health Organization). 2007. Nickel in drinking-water. Background document for preparation of WHO *Guidelines for drinking-water quality.* Geneva, Switzerland; pp. 2–4; https://www.who.int/water_sanitation_health/water-quality/guidelines/chemicals/Nickel110805.pdf?ua=1 (Consulta: junio 2020).

MANEJO CAMPESINO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN HORTO-FLORÍCOLAS: ESTUDIO DE CASO

PEASANT MANAGEMENT OF HORTI-FLORISTIC SYSTEM: CASE STUDY

Ximena **Castillo**¹, Jorge D. **Etchevers**^{1*}, Arturo **Aguirre**², Claudia **Hidalgo**¹

¹ Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados, México. ² Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM, México. (jetchev@colpos.mx).

RESUMEN

El manejo de los sistemas de producción agrícola altera las propiedades del suelo y afecta su funcionalidad. Para medir los cambios y su intensidad, se requieren herramientas sensibles a la función que se desea medir. Los objetivos de este trabajo fueron: conocer la historia agrícola de la zona, definir clases de tierras según los campesinos, identificar los sistemas actuales de producción y su manejo, que permitan sentar bases para seleccionar indicadores de calidad de suelos apropiados. Los indicadores de calidad de suelo dan información cuantitativa objetiva de la intensidad del cambio por el uso del suelo y su efecto en la funcionalidad de los sistemas productivos. Nosotros proponemos incorporar conocimientos empíricos de los productores, recolectados por medio de entrevistas, aplicación de encuestas y observación directa. Este es un enfoque intermedio de carácter cualitativo, complemento del tradicional técnico-científico que se usa con este propósito. El estudio de caso se realizó en cuatro ejidos de Tepeaca, Puebla, con el acopio de información histórica acerca de la incorporación de las tierras al cultivo y riego. En talleres y encuestas con los ejidatarios se definieron: tipos de suelos, cambios de uso en el último medio siglo, patrones de cultivo del pasado y del presente, y manejo de los sistemas de producción horto-florícolas actuales. Los suelos de la zona se han aprovechado desde antes de la colonia y, a mediados del siglo pasado, solo con cultivo de "milpa". La producción de hortalizas y flores ha sido intensa en los últimos 50 años. La historia de cultivo de los suelos de estos ejidos es un registro histórico único en el país, y refleja la influencia de la actividad antrópica en sus características. Los productores identifican tres clases de tierra: Oscuros, Nextlales y Arenosos-Fuertes. Los patrones más frecuentes de uso de las tierras son: 1) flor de corte, 2) hortalizas continuas, y 3) hortalizas con descanso en temporada de secas. La integración del conocimiento de los agricultores con los técnicos, permitió obtener visión ampliada

ABSTRACT

The management of agricultural production systems alters the properties of the soil and affects its functionality. To measure changes and their intensity, tools sensitive to the function to be measured are required. The objectives of this work were: to know the agricultural history of the area, defining classes of land according to the peasants, identifying the current production systems and their management, as the basis for selecting appropriate soil quality indicators. Soil quality indicators provide objective quantitative information on the intensity of change due to land use, and its effect on the functionality of productive systems. We propose to incorporate the empirical knowledge of producers, collected through interviews, application of surveys and direct observation. This is an intermediate approach of a qualitative nature, as complement to the traditional technical-scientific used for this purpose. The case study was carried out in four Ejidos in Tepeaca, state of Puebla, (Mexico) with the collection of historical information about the incorporation of land to cultivation and irrigation. In workshops and surveys with the ejidatarios (the Ejido peasant producers), the following quality variables were defined: types of soils, changes of use in the last half century, past and present cultivation patterns, and management of current horticultural and floricultural production systems. The soils of the area have been managed since before the colony and, in the middle of the last century, only with the cultivation of "milpa". The production of vegetables and cut flowers has been intense in the last 50 years. The cultivation history of soils in these ejidos is a unique historical record in the country, depicting the influence of anthropic activity on their characteristics. Producers identify three classes of lands: Dark, Nextlales, and Strong-sands. The most frequent land use patterns are: 1) cut flowers, 2) vegetables on continue rotation, and 3) vegetables with land rest in the dry season. The integration of the knowledge of the farmers with the technicians, allowed to obtain an expanded vision of the impact of anthropic activities in the region. Documentation of changes in production systems, and soils will serve as the basis for formulating the appropriate soil quality indicators for those conditions.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.
Recibido: julio, 2020. Aprobado: noviembre, 2020.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 55: 159-176. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2393>

del impacto de las actividades antrópicas de la región, a través de la documentación de los cambios en sistemas de producción y en el suelo que servirán de base para formular los indicadores de calidad de suelo apropiados para esas condiciones.

Palabras clave: historia del riego en México, agricultura intensiva, clasificación campesina de tierras, agricultura campesina.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de los sistemas de producción agrícola y el uso creciente de insumos externos en la finca, altera las propiedades del suelo y deteriora su principal funcionalidad: la producción de alimentos sanos. Un rasgo deseable y relevante para evaluar funcionalidad y desempeño de los sistemas de producción agrícola, es la integración del conocimiento empírico de los agricultores con el técnico-científico. Los agricultores, en particular los productores en pequeña escala (campesinos), suelen poseer conocimientos de sus tierras, medio, suelos, plantas y medio ambiente, que los técnicos no tenemos; con los cuales califican a las tierras para definir sus problemas (Barrera y Zink, 2003).

Los campesinos suelen tener una comprensión de los procesos espaciales y temporales que ocurren localmente, que les permite tomar decisiones de gestión de sus tierras. Dicho conocimiento puede ser diferente de las perspectivas científicas, pero son un complemento para conocer mejor los cambios que ocurren a nivel local. La integración del conocimiento técnico-científico con el empírico tiene efectos positivos para la gestión sostenible de la tierra, ya que las estrategias de uso diseñadas localmente se limitan a la optimización de recursos específicos que pueden contribuir al desarrollo sano, tanto económico como ecológico.

Algunos estudios señalan que el intercambio mutuo de información beneficia la implementación práctica de las evaluaciones de calidad de suelo (Karlen *et al.*, 2003; Bünemann *et al.*, 2018) y ayuda a la selección de nuevos indicadores locales (Barrios *et al.*, 2006). Por ejemplo, en México, Ortiz *et al.* (1990) y Ortiz y Gutiérrez (2001) propusieron una metodología que utiliza conocimiento local para mapear clases de tierra, que fue útil para determinar unidades de suelo a escala local. Vergara y Etchevers (2004) usaron propiedades físicas, químicas y biológicas como indicadores de calidad de los suelos de parcelas de

Key words: history of irrigation in Mexico, intensive agriculture, peasant land classification, peasant agriculture.

INTRODUCTION

The intensification of agricultural production systems and the increasing use of external inputs to the farm alters soil properties and deteriorates their main functionality: healthy food production. A desirable and relevant feature for evaluating agricultural production systems functionality and performance is integrating farmers' empirical knowledge with technical-scientific knowledge. Farmers, particularly small-scale producers (peasants), know features in their lands, conditions, soils, plants, and environment, which technicians do not have, with which they qualify lands to define their problems (Barrera and Zink, 2003).

Peasants understand the spatial and temporal processes that occur locally, enabling them to make management decisions for their lands. Such knowledge may be different from scientific perspectives, but they complement the better understanding of changes that occur at the local level. The integration of technical-scientific knowledge with the empirical knowledge has positive effects on the sustainable management of the land. Because land use strategies designed locally are focused on optimizing specific resources, thus contributing to healthy rural development, both economic and ecological.

Some studies indicate that the mutual exchange of information benefits the practical implementation of soil quality assessments (Karlen *et al.*, 2003; Bünemann *et al.*, 2018); it also helps selecting new local indicators (Barrios *et al.*, 2006). For example, in Mexico, Ortiz *et al.* (1990) and Ortiz and Gutiérrez (2001) proposed a methodology that uses local knowledge to map land classes, which was useful for determining soil units on the local scale. Vergara and Etchevers (2004) used physical, chemical, and biological properties as indicators of soil quality in small size plots. Those characteristics or attributes that coincided with the qualitative assessments indicated by small agricultural producers to define the quality of their lands.

Based on previous research, such as those aforementioned, authors included the active participation of small-scale producers in the study

tamaño pequeño, características o atributos que coincidían con apreciaciones cualitativas señaladas por los pequeños productores agrícolas, para definir la calidad de sus suelos.

Con base en investigaciones previas, como las ya mencionadas, los autores incluyeron la participación activa de los productores en pequeño de la zona de estudio, para recopilar antecedentes de la historia de sus predios y sumar el conocimiento empírico al técnico-científico de sus tierras y sistemas de producción. Los objetivos del estudio fueron: 1) revisar información histórica para entender el estado actual de la calidad de los suelos; 2) definir las unidades de suelo según la clasificación campesina de tierras; 3) identificar los sistemas agrícolas actuales y su estado; y 4) clasificar los principales patrones de cultivo y manejo, para establecer indicadores de calidad de suelo apropiados a los sistemas intensivos de producción horto-florícolas actuales que puedan extrapolarse a otras condiciones similares.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó entre 2016 y 2019 en cuatro ejidos ubicados al sur del municipio de Tepeaca, Puebla: Candelaria Purificación, San Nicolás Zotapetlayoca, San Hipólito Xochilténango y Santa María Oxtotipán, en adelante, Candelaria, San Nicolás, San Hipólito y Santa María. Estos ejidos se ubican en el entorno del cruce de las coordenadas 18° 56' 28.92" N y 97° 52' 03.23" O, a 2150 m. El clima de la zona es templado subhúmedo con lluvias en verano y 15.5 °C de temperatura media anual y precipitación media anual de 747 mm (INEGI, 2000; 2011).

En el municipio de Tepeaca el INEGI (2011) reporta siete unidades de suelo: Chernozem, Calcisol Durisol, Phaeozem, Leptosol, Fluvisol, y Cambisol, y las dos primeras son dominantes. Pero los productores tienen sus propias clasificaciones, que se sistematizaron con la cartografía de clases Tierras Campesinas (Ortiz *et al.*, 1990). Para ello, se realizaron talleres participativos para elaborar un mapa de clases de suelos que incluyera la visión de los campesinos. La veracidad de la clasificación se verificó mediante recorridos de campo con productores en cada ejido, quienes indicaron los límites de cada clase de tierra.

Las clases se delimitaron con su trazo sobre imágenes de satélite de Google Earth del 2018 para generar un mapa base y luego un mapa digital con ArcGis 10.5 (ESRI, 2017) y se obtuvieron muestras de suelos para determinar la textura y el contenido de carbonato de calcio de las tierras, aunque esos mapas no se presentan aquí. La topografía del área de estudio es plana, con ligera pendiente hacia el sureste (menor al 10%); con una elevación

area to gather background information on the history of their parcel lands, and to add empirical knowledge to the technical-scientific knowledge of their lands and production systems. The objectives of the study were: 1) to review historical information to understand the current status of soil quality; 2) to define land units according to their peasant land classification; 3) to identify current agricultural systems and their status; and 4) to classify the main cultivation, and management patterns, in order to establish soil quality indicators appropriate to the current intensive horticultural-floricultural production systems for extrapolation to other similar conditions.

MATERIALS AND METHODS

The research was carried out between 2016 and 2019 in four ejidos located south of the municipality of Tepeaca, state of Puebla (Mexico): Candelaria Purificación, San Nicolás Zotapetlayoca, San Hipólito Xochilténango, and Santa María Oxtotipán, Hereinafter: Candelaria, San Nicolás, San Hipólito, and Santa María. These ejidos are located around the intersection of coordinates 18° 56' 28.92" N and 97° 52' 03.23" W, at 2150 m. The climate in the area is temperate subhumid with rains in summer; 15.5 °C average annual temperature, and 747 mm average annual precipitation (INEGI, 2000; 2011).

In the municipality of Tepeaca, INEGI (2011) reports seven soil units: Chernozem, Calcisol Durisol, Phaeozem, Leptosol, Fluvisol, and Cambisol, and the first two are dominant. However, the producers have their own classifications, which they systematized along with the class mapping system Tierras Campesinas (Ortiz *et al.*, 1990). To this end, we held participatory workshops with ejidatarios, to develop a soil class-map that included their peasant vision. Field trips with producers in each Ejido served to verify their classification, as they indicated the boundaries of each type of land class.

The borders of those soil classes were drawn on 2018 Google Earth satellite images to generate a base map, and a digital map with ArcGis 10.5 (ESRI, 2017). Soil samples were collected to determine the texture and calcium carbonate content, but these maps are not included in this paper. Topography at the study area is flat, with a slight slope towards the southeast (less than 10%); with a marked elevation

marcada en la parte media con pendientes de 30 a 45%. La ubicación predominante de las parcelas agrícolas es en las zonas planas y los asentamientos humano y servicios en la zona de mayor pendiente. En esta última está Barranca del Águila, donde fluye un río que nace en las faldas de La Malinche y su agua se utiliza desde hace para la agricultura de riego.

La historia del uso de las tierras se revisó en la literatura. Para conocer los cambios más recientes, se realizaron talleres participativos y se encuestó a los productores. Con esa ayuda se identificaron los principales patrones de cultivo y las prácticas de manejo, que expliquen las causas de la alteración de la calidad del suelo, y los principales patrones de cultivo. El cuestionario diseñado *ex profeso* permitió recopilar información acerca de: prácticas históricas de agricultura; cambios en los patrones de cultivo; cultivos que se siembran en la región de estudio; cómo definen los productores qué cultivo sembrar; cómo agrupar los cultivos y la forma en que se siembran; los cambios ocurridos después de la construcción de los pozos (Montero, 2008) y el establecimiento de canales de comercialización de los productos del campo.

Estas variables definen las prácticas socio-técnicas actuales y ayudan a entender el estado actual del suelo. El cuestionario socio-técnico se aplicó a 65 productores clave y a autoridades ejidales de Santa María (15), San Hipólito (19), Candelaria (20) y San Nicolás (11). Los encuestados eran productores en activos, con actividad continua, fuesen o no ejidatarios, habitantes en el área de estudio y con acciones directas en el recurso para la producción y sobre la tierra. Hubo personas que aun siendo ejidatarios no trabajaron sus tierras, las dieron en renta o establecieron convenios de participación con los trabajadores en activos, y no se incluyeron en la encuesta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Información histórica

Los resultados de revisión de la historia y las encuestas se presentan en el Cuadro 1. Los ejidos San Hipólito y Santa María fueron asentamientos agrícolas prehispánicos. En San Hipólito hay evidencias de galerías filtrantes y canales de riego, que datan de la época anterior a la llegada de los españoles (Medina *et al.*, 2016) y permanecen hasta hoy. La fuente principal de agua era el río Barranca del Águila (Montero, 2008). Las galerías se habrían construido para favorecer la captura de agua de los manantiales que emanaban todo el año. Los canales conducían agua de riego. El agua de la Barranca del Águila permitió la diversificación de las siembras y el establecimiento de más de un ciclo de cultivo por año desde aquellas épocas. Esta región proveía hortalizas a Tepeaca,

in the middle section with slopes of 30 to 45%. The predominant location of those agricultural plots is in the flat areas, and the human settlements, and services are located in the steepest area. The latter corresponds with Barranca del Aguila, where a river flows from the slopes of mount La Malinche, these waters are used per centuries for irrigated agriculture.

The history of land use was reviewed in available literature. In addition, we held participatory meetings with producers, and a survey was applied to learn about the most recent changes. With this help, the main cultivation patterns and management practices identification was possible, which helped explain the causes of soil quality alteration, and the main cultivation patterns. The particularly designed questionnaire made it possible to collect information about historical agricultural practices; changes in cropping patterns; crops grown in the study region; how producers define which crop to plant; how to group crops and how they are grown; the changes that occurred after the construction of the wells (Montero, 2008); and the establishment of marketing channels for farm products.

These variables define current socio-technical practices and help to understand the current state of the soil. The socio-technical questionnaire was applied to 65 people, joining key producers, and the authorities of Ejidos Santa Maria (15), San Hipolito (19), Candelaria (20) and San Nicolas (11). The respondents were active producers, with continuous activity, whether they were ejidatarios (land tenants at their Ejido) or not, inhabitants in the study area, and with direct activities on resources and lands for production activities. Some people did not work their lands, even though they were ejidatarios. Instead they gave lands for rent, or established participation agreements with other active workers; those people was not included in our survey.

RESULTS AND DISCUSSION

Historical information

Historical review and survey results are shown at Table 1. The ejidos San Hipolito and Santa Maria were pre-Hispanic agricultural settlements. In San Hipolito, there is evidence of filtering galleries, and irrigation channels dating from before the Spanish arrival (Medina *et al.*, 2016) that remain to this day. The main source of water was the Barranca del

Cuadro 1. Datos históricos de Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás.
Table 1. Historical data of Ejidos, Santa Maria, San Hipolito, Candelaria, and San Nicolas.

Ejido	Candelaria	San Nicolás	San Hipólito	Santa María
Año de constitución [†]	1926	1918	1917	1918
Superficie total [‡]	304.9 ha	267.5 ha	500 ha	466.4 ha
Área parcelada [‡]	266.7 ha	229 ha	454.2 ha	318.8 ha
Dotación/ ejidatario	2.5 ha	2 ha	2 ha	4.5 ha
Riego agua pozos [§]	1980	1980	Canales de 1520 ^b	1980
Cultivos [‡]	1530	Se desconoce		1530
Milpa ^{††}	1926	1918		1918
Hortalizas (inicio)	1980-90	1980-90	<1500	1980-90
Flores (inicio)	1990	2000	1990	2000

[†]Información del Registro Agrario Nacional (RAN, 2018). [‡]Información del Plano del Ejidal. Los datos de superficie parcelada, obtenidos de los planos ejidales, no corresponden con el área real actual de las parcelas del ejido, debido a que ha cambiado el tipo de uso de agrícola a urbano. [§]Información directa de los productores. Año aproximado de cambio en los patrones de cultivo. ^bMedina *et al.* (2016). [‡]Según Grosso (1996) estos cultivos eran maíz (*Zea mays*), trigo (*Triticum aestivum*) y chile (*Capsicum annuum*). ^{††}Según la información de los productores, la milpa tenía maíz, frijol (*Phaseolus vulgaris*), haba (*Vicia faba*) y calabaza (*Cucurbita pepo*), productos de la dieta de la población local. [‡]Information from the Registro Agrario Nacional (RAN, 2018). [‡]Information on the Ejido Plan maps. The parceled surface data obtained from the ejido plans do not correspond to the current ejido parceled area, because the type of land use has changed from agricultural to urban. [§]Direct information from producers. Approximate year of change in cropping patterns. ^bMedina *et al.* (2016). [‡]According to Grosso (1996), these crops were maize (*Zea mays*), wheat (*Triticum aestivum*), and chili (*Capsicum annuum*). ^{††}According to the information of the producers, the *milpa* cultivation included maize, beans (*Phaseolus vulgaris*), broad beans (*Vicia faba*), and squash (*Cucurbita pepo*), all of them products in the local population diet.

donde funciona desde hace varios siglos el tianguis más importante de nuestro país (Yanez, 1991).

Segura de la Frontera Tepeaca se fundó 1520, como segunda ciudad española de México (Martínez, 1984). Las primeras haciendas se establecieron entre 1539 y 1602 (Vélez, 1993). Aún están los cascos de las haciendas Candelaria (ahora ejido Candelaria) y Santa María (ahora, los ejidos de Santa María y San Hipólito), que producían maíz, trigo y chile (Grosso, 1996).

Del ejido de San Hipólito se supone que ha tenido una agricultura de riego desde épocas pre-hispánicas. Los ancianos recuerdan que antes de la perforación de los pozos, ya producían jitomate (*Solanum lycopersicum*), zanahoria (*Daucus carota*), chile (*Capsicum annuum*), cebolla (*Allium cepa*) y algunas flores. En contraste, los demás ejidos mantuvieron una agricultura de temporal, con cultivos básicos y milpa (maíz, frijol, haba y calabaza integrados) hasta que realizaron la perforación de los pozos para riego. Entre 1970 y 1980 el Estado promovió la producción de hortalizas y paquetes tecnológicos que fomentaron el uso de fertilizantes y pesticidas en la región (Lugo *et al.*, 2010).

Aguila River (Montero, 2008). The galleries favored the capture of water from the springs that emanated year-round. The channels carried irrigation water. The water from the Barranca del Aguila allowed the diversification of crops, and the establishment of more than one crop cycle per year since those times. This region supplied vegetables to Tepeaca, where the most important street market in our country has operated for several centuries (Yanez, 1991).

“Segura de la Frontera Tepeaca” was founded in 1520, as the second Spanish city in Mexico (Martínez, 1984). The first haciendas (huge land extensions with a single land owner) were established between 1539 and 1602 (Vélez, 1993). There, the hulls remain of haciendas, La Candelaria (now Ejido Candelaria), and Santa Maria (now Ejido Santa Maria and Ejido San Hipolito); which produced maize, wheat and chili (Grosso, 1996).

Ejido San Hipolito is supposed to have had irrigated agriculture since pre-Hispanic times. The elders remember that before drilling the wells, they already produced tomatoes (*Solanum lycopersicum*), carrots (*Daucus carota*), chili (*Capsicum annuum*), onion (*Allium cepa*), and some cut flowers.

Los agricultores mencionaron una práctica común en la antigüedad, el “enlamado o barranqueo”, consistente en inundar cada año las parcelas con agua con sedimentos provenientes de las zonas altas de la barranca, para mantener la fertilidad de los suelos (CONAGUA, 2018). Hoy el “enlame” ya no se realiza, porque el agua de la barranca contiene aguas residuales que emite la población asentada en sus bordes, por tanto, aquella práctica tradicional sería perjudicial para la calidad del suelo. También ha disminuido la práctica del estercolado. Antes las familias tenían animales de traspatio, borregos (*Ovis aries*), vacas (*Bos taurus*), marranos (*Sus scrofa domesticus*), y gallinas (*Gallus gallus domesticus*), y cada año aplicaban el estiércol seco a sus parcelas. Hoy, tienen pocos animales, por lo que la cantidad de estiércol disponible ha disminuido.

En el pasado los agricultores de estos ejidos vendían o intercambiaban sus productos excedentes en el tianguis de Tepeaca, hoy lo hacen en “La Central de Abasto de Huixcolotla”, el centro de comercialización de productos agrícolas más importante de la región (Arvizu *et al.*, 2014), el cual atrajo a comercializadoras de agroquímicos que introdujeron insumos agrícolas nuevos y transformaron las prácticas socio-técnicas de los productores, al hacerlas más intensivas. Esto explica muchas formas del manejo actual de las parcelas. Otros cambios ocurridos en esas comunidades en décadas recientes se manifiestan en el aumento de la migración hacia los Estados Unidos, la diversificación de actividades económicas en la región y la disminución del porcentaje de familias que se dedican a las actividades del campo.

Clasificación de tierras campesinas

La aplicación de la tipología de Tierras Campesinas (Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz y Gutiérrez, 2001) mostró la existencia de tres tipos de tierras dominantes en los ejidos: Oscuros, Nextlales y Arenosos-fuertes. Cuadro 2.

Obscuros

Esta clase de tierra predomina en el ejido de Santa María, que está en una posición topográficamente superior respecto a los otros tres ejidos. El contenido menor de carbonatos los hace más oscuros en

In contrast, other ejidos maintained seasonal agriculture, with basic crops and milpa (integrating maize, beans, broad beans, and squash) until they drilled the irrigation wells. Between 1970 and 1980, the State promoted the production of vegetables, and technological packages that introduced fertilizers and pesticides in the region (Lugo *et al.*, 2010).

The farmers mentioned a common practice in ancient times, “*enlamado* or *barranqueo*” technique, consisting of flooding the plots each year with water with sediments from the high areas of the ravine to maintain the fertility of the soils (CONAGUA, 2018). Nowadays, the “*enlamado*” is no longer carried out because the water in the ravine contains wastewater from the population settlement on its edges; therefore, that traditional practice would be detrimental to the soil quality today. The practice of adding manure has also decreased. In the past, families had backyard animals, sheep (*Ovis aries*), cows (*Bos taurus*), pigs (*Sus scrofa domesticus*), and chickens (*Gallus gallus domesticus*), and each year they applied dry manure to their plots. Today, they have few animals, so the amount of manure available has decreased.

In the past, these ejido farmers sold or exchanged their surplus products in the Tepeaca market. Today they do so in “La Central de Abasto de Huixcolotla”, the most important commercial center of agricultural products in the region (Arvizu *et al.*, 2014). This commercial center attracted agrochemical marketers who introduced new agricultural inputs, and transformed the socio-technical practices of producers by making them more intensive. The latter explains many forms of current parcel management. Other changes in these communities occurring in recent decades are the increase in migration to the United States, the diversification of economic activities in the region, and the decrease in families percentage committed to rural activities.

Classification of peasant lands

The application of the land typology “Tierras Campesinas” (Ortiz *et al.*, 1990; Ortiz and Gutiérrez, 2001) showed the existence of three dominant types of lands in the Ejidos: Dark (Obscure), Nextlales, and Strong sands (Table 2).

Cuadro 2. Promedio de las características intrínsecas de las tierras campesinas clasificadas en los ejidos Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás.[†]

Table 2. Mean value of the intrinsic characteristics of the peasant lands classified in the ejidos Santa María, San Hipolito, Candelaria and San Nicolas.[†]

Tipo de suelo	Profundidad	Concentración de CaCO ₃	Textura
	Metros	%	-
Obscuros	> 3	4.23	Franca
Nextlales	< 0.5	17.75	Franco arenosa
Arenosos-Fuertes	1.5	6.91	Franca - Franco arcillosa

[†]X. Castillo realizó estos análisis. ❖ Analyses carried out by the first author.

comparación con los otros dos tipos de suelos definidos; los oscuros son profundos (más 3 m) y con textura franca; y con buen manejo, su productividad es media- alta.

Nextlales

Este segundo tipo se ubica en las laderas de los ejidos de Santa María y San Hipólito, y las tierras corresponden con las áreas periurbanas o áreas de uso común donde se mantiene el “monte” o vegetación nativa. Los suelos son poco profundos (menos de 0.5 m) y en algunas áreas aflora roca caliza (tepetate blanco). La concentración de carbonatos promedio es 17.7 %; en esta clase de tierras existen pocas parcelas agrícolas. Los productores consideran que tienen fertilidad baja y los cultivos se “amarillan”. El ejido Candelaria está en la zona norte y las tierras se caracterizan por tener un color blanquecino.

Arenosos-fuertes

Estas tierras predominan en la zona baja de la región de estudio, en los tres ejidos; son de textura franca a franco arcillosa al avanzar la pendiente hacia el sureste. Los agricultores relacionan este cambio de textura con la práctica antigua de “enlamar o barranquear”. La profundidad promedio de este suelo es 1.5 m y se considera de productividad mediana a alta, si el manejo es correcto.

Estado actual de los sistemas agrícolas

Los resultados de las encuestas socio-técnicas y la clasificación de los patrones de cultivo representativos

Dark (Obscure)

This type of land predominates in the Santa Maria ejido, which is in a topographically superior position compared to the other three ejidos. The lower carbonate content makes these soils darker compared to the other two defined soil types. These dark ones are deep (more than 3 m), and with a loamy texture; also, with good management their productivity is medium-high.

Nextlales

This second type of soil is found on the slopes of Ejido Santa Maria and Ejido San Hipolito. These lands correspond to suburban areas or common use areas, where “wild” or native vegetation is maintained. The soils are shallow (less than 0.5 m) and limestone rock (white *tepetate*) is apparent. The average carbonate concentration is 17.7%; few agricultural plots exist in this land class. Producers consider that they have low fertility and the crops “turn out yellow”. Ejido La Candelaria is in the northern zone, and its lands show whitish color.

Strong sands

These lands predominate in the lower zone of the study region, in the three ejidos. They have a loamy to clay loam texture as the slope advances to the southeast. Farmers relate this change in texture to the ancient practice of “enlamado” (flooded with upriver sediments). The average depth of this soil is 1.5 m, and its productivity is medium to high, if the management is correct.

del área de estudio se describen a continuación. En Candelaria hay 121 ejidatarios, 220 en San Nicolás, 303 en San Hipólito y 103 en Santa María (RAN, 2018). Pero el número de productores activos y que viven en la comunidad, es mucho menor. Como ejidatarios, avendados y posesionarios están registradas 1095 personas, número que contrasta con el total de productores activos (333), esto es, menos de un tercio de los inscritos son productores activos (RAN, 2018). Los que no se dedican al campo son personas de edad avanzada que han cedido sus derechos ejidales, solo 48% de los productores activos son ejidatarios. Este hecho es importante porque las decisiones acerca del rumbo y futuro del ejido se toman en las juntas ejidales, y solo tienen voz y voto los ejidatarios; lo cual deja fuera la opinión de algunos productores activos que no lo son.

La edad promedio de los productores activos fue 43.4 años (en un intervalo de 21 a 72 años) con la secundaria como escolaridad promedio, y se encontró que existe una relación inversa entre edad y escolaridad. La agricultura en estos ejidos es una actividad familiar, donde los miembros de la familia participan de forma permanente o temporal. El 87% de los productores realiza otra actividad económica, aparte de la agricultura. Los oficios registrados fueron: 1) panadero, albañil, mecánico, carpintero, yuntero, jornalero, etc.; y 2) trabajo asalariado como operador de autobús, maestro o ayudante en alguna empresa o empacadora. Este hecho impide que esos productores dediquen todo su tiempo a las actividades del campo. Solo 12% de los productores tuvo como actividad económica única la agricultura, y fue también el tipo de productor que sobresalió por buscar la innovación en su forma de producir.

Los productores no ejidatarios (48%) trabajaron las tierras de sus padres o de algún familiar. En ocasiones, tomaron en renta tierras de otros ejidatarios que no se dedicaron a la agricultura, o trabajaron en acuerdos “apalabrados”, y compartieron gastos de producción y terreno (“trabajo a medias”). El 64% de productores encuestados, trabajó terrenos rentados o “a medias” o ambos. Este tipo de acuerdos se realizan por ciclo agrícola o por año.

La superficie promedio trabajada por cada productor varió entre 1 y 7 ha. La superficie de trabajo en relación con la dotación original disminuyó, por el aumento del número de productores en la comunidad y de personas de otras comunidades que

The current state of agricultural systems

The socio-technical surveys and the classification of the representative cultivation patterns of the study area are as follow. Regarding the number of ejidatarios (land tenant peasants), there are 121 in Ejido La Candelaria; 220 in Ejido San Nicolas; 303 in Ejido San Hipolito; and 103 in Ejido Santa Maria (RAN, 2018). However, the number of active producers living in the community is much lower. There is a total of 1095 registered as ejidatarios, community dwellers, or “possessors” (with land use rights) but this number contrasts with the total number of active producers (333). That is, less than a third of those registered as ejidatarios are active producers (RAN, 2018). Those not actively working in the fields are older adults who have given up their ejido rights; only 48% of the active producers are ejidatarios. This fact is important because decisions on direction and future management of the Ejido are responsibility of the Ejido Commissariat. Only the ejidatarios have voice and are able to vote, leaving out the opinion of some active producers who are not formally registered as ejidatarios.

The average age of the active producers was recorded as 43.4 years (the interval from 21 to 72 years), with junior high (secondary) as the average schooling grade. We found an inverse relationship between age and schooling. Agriculture in these ejidos is a family activity, where family members participate permanently or temporarily. The 87% of the producers work in another economic activity, besides agriculture. These recorded works were: 1) baker, bricklayer, mechanic, carpenter, guider of a yoke of oxen, laborer, etc.; and 2) employers as public transport driver, teacher, or assistant in a packing facility. This fact prevents these producers from dedicating all their time to land activities. Only 12% of producers had agriculture as their sole economic activity, and it was also the type of producer remarkable for seeking innovation in their ways of production.

Producers classified as non-ejidatario (48%) worked the land that belong to their parents or another relative. They often rented land from other ejidatarios who were not engaged in agriculture production, or they worked through verbal agreements (honoring the given word), sharing land and production costs. These agreements are called “half-labor”; 64% of

toman en renta tierras agrícolas; y porque el agua de los pozos no alcanza para regar una superficie mayor. Por el tamaño de la superficie trabajada se trata de ejidos con pequeñas unidades de producción. Según INEGI (2007), en México las unidades de producción menores a 5 ha representan 67.8% de las unidades pequeñas con actividad agropecuaria o forestal en el país, y aportan cerca 39% de la producción agropecuaria nacional (IICA, 2013).

Manejo del recurso agua con fines agrícolas

El agua de riego para uso agrícola proviene de 16 pozos, se distribuye por compuertas, canales o tuberías hasta las parcelas, y se riega por gravedad. El ejido Candelaria, además usa agua residual de Tepeaca. San Hipólito y San Nicolás usan, en ocasiones, agua de la Barranca del Águila que recibe descargas no tratadas de drenajes de pueblos ubicados río arriba. Para el manejo del agua de los pozos los productores están organizados en sociedades, mismas que se constituyeron desde el momento en que realizaron los trámites de su perforación (Cuadro 3). Cada miembro de las sociedades tiene acciones de agua (riego). Por cada acción se pagan cuotas mensuales para el mantenimiento del pozo

the surveyed producers worked on rented lands, or “half-labored”, or both. The typical types of these agreements are per agricultural cycle or per year.

The average area worked by each producer varied between 1 and 7 ha. Labored areas compared to the original endowment decreased due to the increase in the number of producers in the community, and the number of people from other communities who rent agricultural lands. Also because the water in the wells is not enough to irrigate a larger surface. Regarding the size of labored area, ejidos in this study are formed by small production units. According to INEGI (2007), in Mexico, the production units of less than 5 ha represent 67.8% of the small units with agricultural or forestry activity in the country. They contribute with about 39% of the national agricultural production (IICA, 2013).

Management of water resources for agricultural purposes

Irrigation water for agricultural use comes from 16 wells, is distributed through gates, channels, or pipes to the plots, and is supplied by gravity. The ejido Candelaria also uses residual water from

Cuadro 3. Datos de los pozos de riego de los ejidos de Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás.[†]
Table 3. Data of the irrigation wells of the Ejidos: Santa Maria, San Hipolito, Candelaria and San Nicolas.[†]

Ejido	Pozos	Gasto	Socios	Turno horas	Extracción según título, m ³ a ⁻¹
Santa María	A.U.R. Soc. de Ejidat. Sta. María Oxtotipan Bet-7, AC	8"	52	12	436 665
	A.U.R. Oxtotipan Bet-8 AC.	8"	58	12	557 928
	Sector producción 2, AC.	5"	22	12	180 000
	Las Flores Cornejal, SPR-RI	8"	-	6	423 000
	Produc. Rurales Oxtotipan, SPR-RL	8"	-	6	400 000
	U. R. para desarrollo rural Oxtotitlan SPR-RL	8"	-	6	576 000
San Hipólito	Pozo Vargas San Hipólito, SPR-RI	6"	60	6	240 000
	Pozo Agua Bendita, SPR-RI	7"	59	6	300 000
	Pozo Agua Azufrada, SPR-RI	5"	170	6	220 224
Candelaria	UR Candelaria Purificación, Pozo SPR-RL	6"	64	12	266 112
	El Garciluz, SPR-RI.	6"	43	12	90 720
	Pozo 3 San Isidro, SPR-RL	5"	56	12	180 000
San Nicolás	R. Huerta R. y Ma. A. Gamboa M.	6"	-	12	27 833
	Pozo 1 San Nicolás Zoyapetlayoca, SPR-RI.	5"	36	12	108 000
	Sociedad El Colorín Pozo 2, SPR-RI.	5"	22	12	150 000
	Pozo 3 Zoyapetlayoca, SPR-RI.	5"	21	12	246 000

[†]Datos obtenidos de las encuestas y los talleres participativos. (-) no se cuenta con el dato. Información obtenida del Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA, 2019). ♦ [†]Data obtained from surveys and participatory workshops. (-) data not available. Information obtained from the Registro Público de Derechos de Agua (CONAGUA, 2019).

y para el pago del servicio de consumo de luz para la extracción de agua. Por ejemplo, en el año 2019, la cuota osciló entre \$180 y \$500 MXN (8.96 – 24.91 USD), según el número de miembros de cada sociedad.

Una acción de agua es el derecho que tienen los productores para regar una hectárea durante un turno de agua, cuya duración varía en función del volumen de agua que se extrae del pozo. El tiempo que transcurre en repetir turno, depende del número de miembros de la sociedad. Por ejemplo, el Pozo 1 del ejido Candelaria tiene 64 miembros, los turnos son de 12 h, el cambio se realiza a las 07:00 y 19:00 h, y tarda 32 d para que el agua de riego se suministre de nuevo a cada productor. Los pozos funcionan las 24 h del día, los 365 d del año. La profundidad de los pozos varía de 80 a 100 m y aumenta en modo progresivo con los años, debido a la disminución del espejo del agua. Los propietarios de las acciones de riego pueden vender su acción; su costo promedio en el 2019 fue de 80 mil pesos y la venta depende de la aceptación del comprador por la sociedad. Los propietarios de las acciones de agua también pueden vender horas de sus turnos, o sus turnos completos, a otros productores que lo soliciten. La hora de riego en 2019 costó entre \$100 y \$300 pesos, y 56% de los productores encuestados compraron agua.

Entre los ejidos hay diferencias en el uso y manejo del agua para fines agrícolas. En Santa María, el de mejor situación, el agua alcanza para todas las parcelas y no utiliza agua residual, pero 45% de los productores encuestados compra agua. Posee 100% de canales entubados e hidrantes para que el agua entre a las parcelas. Este ejido tiene seis pozos: Bet 7 y Bet 8 sus socios son los ejidatarios que riegan 52 y 58 ha, respectivamente; los otros cuatro se ubican en el sector de producción 2. Sólo uno de ellos lo usan los productores para labores agrícolas; el agua de las tres restantes se vende a gente del pueblo y a productores de los ejidos de San Hipólito y San Nicolás.

El ejido Candelaria tiene cuatro pozos, uno de ellos con la mitad de la línea de distribución entubada, el agua restantes se distribuye por canales 50% revestido. El 30% de los productores de este ejido compran agua y 52% usa agua residual, sobre todo en temporada seca y de calor (marzo a mayo), que se usa para regar flores. El agua residual viene de la cabecera municipal de Tepeaca y la utilizan desde hace 20 años. Algunos productores de flores mencionaron

Tepeaca. San Hipólito and San Nicolás sometimes use water from the Barranca del Águila, that receives untreated discharges from drains of towns located upstream. For the water management from dwells, the producers organized themselves into associations, established from the moment they drilled those wells (Table 3). Each member of the society has shares of water (irrigation). They pay monthly fees for each share to maintain the wells, and to pay the electricity consumption service for the extraction of water. The fee ranged between \$ 180 and \$500 MXN pesos (8.96 - 24.91 USD), depending on the number of members in each association in 2019.

A water share is a right that producers have to irrigate one hectare during a water shift, the duration of which varies depending on the volume of water drawn from the well. The time that passes in repeating turn depends on the number of members of the society. For example, Well 1 of La Candelaria ejido has 64 members, the shifts are every 12 h, at 07:00 and 19:00 h, and it takes 32 d for the irrigation water to return to each producer. The wells are working 24 h per day, 365 d a year. The wells depth varies from 80 to 100 m and it increases progressively over the years due to the water table decrease. Irrigation shareholders can sell their share; average cost in 2019 was \$80 000 MXN pesos, and the sale depends on the association accepting the buyer. The water share owners can also sell hours of their shifts, or their entire shifts, to other producers who request them. The irrigation hour in 2019 cost between \$100 and \$300 MXN pesos; 56% of the surveyed producers bought water.

Among the ejidos there are differences in the use and management of water for agricultural purposes. In Santa María, the one in the best condition, the water is enough for all the plots and wastewaters are not used, 45% of the surveyed producers buy water. It has 100% piped channels and hydrants for water supply to the plots. This ejido has six wells: Bet 7 and Bet 8. Its partners are the ejidatarios, who irrigate 52 and 58 ha, respectively; the other four wells are in production sector 2. Only one of them provides water to the producers, for their agricultural work. The water from the remaining three wells is sold to townspeople and producers from Ejido San Hipólito and Ejido San Nicolás.

The Candelaria ejido has four wells, one of them with half of the distribution line piped, the

que solo usan esta agua para cubrir todas las necesidades hídricas de sus cultivos, y reconocen que aporta nutrientes al suelo.

En el ejido de San Hipólito hay tres pozos y el agua no alcanza para regar todas las parcelas y hay algunas que ya no se trabajan. Los productores (54%) compran agua de los pozos de Santa María. San Hipólito ocupaba agua de la Barranca del Águila para regar, pero desde hace 20 años las descargas de drenajes río arriba contaminan y dañan a los cultivos. Sin embargo, a pesar del riesgo, la siguen usando de forma esporádica cuando es muy necesario.

El ejido de San Nicolás tiene tres pozos y el agua que extraen no alcanza para regar todas las parcelas, por ello 28% de las parcelas se trabaja solo con régimen de temporal y 57% de los productores compra agua a los accionistas de los pozos del ejido de Santa María. En este ejido también se ocupa el agua de la Barranca del Águila, como en San Hipólito, y se ha observado daños a los cultivos.

Los resultados de las encuestas y entrevistas arriba descritas, muestran que uno de los problemas principales de estos ejidos es la escasez del agua para uso agrícola, en particular durante las épocas de mayor demanda. Dos situaciones son evidentes. La primera, que el incremento de la población en los ejidos ha creado una demanda agregada de agua para uso doméstico y con ello ha disminuido el agua para la agricultura, fenómeno que no es exclusivo de esta zona. La segunda reflexión es que existe una ausencia de una normativa que impida que se comercialice el agua de los pozos perforados; la perforación muchas veces se hace con dinero fiscal, y los pozos se entregan en dominio a los productores.

Cultivos actuales

Otro tema analizado en los talleres fue la demanda de insumos para los cultivos y los costos de su adquisición por hectárea y ciclo. Estos costos van de 5 mil (zempoalxóchitl) hasta 70 mil pesos (ajo). La estimación consideró el costo de la semilla o plántula, costo de fertilizantes, los productos para el control de plagas y enfermedades, así como otros insumos foliares y mano de obra para realizar las actividades específicas del cultivo. Las categorías de costo se clasificaron en función de la demanda de insumos en: Baja, Baja-Media, Media, Media-Alta, Alta.

remaining water is distributed through channels 50% lined. Near 30% of the ejido producers buy water, and 52% use wastewaters, especially in the dry and hot season (March to May), used to water cut flowers cultivation. The wastewater comes from the Tepeaca Municipality and has been in use for 20 years. Some flower growers mentioned that they only use this water to cover water needs to all their crops and recognize that it provides nutrients to the soil.

There are three wells in the San Hipolito ejido, and the water is not enough to irrigate all the plots, and some land is no longer under production. Producers (54%) buy water from wells in Santa Maria. Ejido San Hipolito also used water from the Barranca del Aguila to irrigate, but for the past 20 years, upstream drainage discharges have contaminated and damaged the crops. However, despite the risk, producers continue to use this water sporadically, when it is indispensable.

The San Nicolas ejido has three wells, and the water they extract is not enough to irrigate all the plots. Therefore, 28% of the plots produce only temporarily (rainfed), and 57% of the producers buy water from Santa Maria wells shareholders. This ejido, as it occurs at San Hipolito, also uses water from the Barranca del Aguila, and producers report crop damage.

The results of the surveys and interviews described above show that one of the main problems of these ejidos is the scarcity of water for agricultural use, particularly during times of most significant demand. Two situations are obvious. The first is that the increase in the population in the ejidos has created an aggregate demand for water for domestic uses, and water for agriculture has decreased, this phenomenon is not exclusive to this area. The second circumstance is that there is an absence of a regulation that prevents the water from drilled wells from being marketed. Money for drilling the wells proceeded from governmental taxes revenue, but the use of wells commission is under producers' control.

Current crops

Crops inputs demand and production costs per hectare and crop cycle was another topic analyzed in the workshops. These costs range from \$5000 (zempoalxóchitl) to \$70 000 MXN pesos (garlic).

Costo bajo

En esta categoría se ubicó a los cultivos para los cuales por lo regular no se requiere comprar semilla o plántula; sino que se obtienen de siembras previas, o se intercambian, o proceden de la compra-venta que se realiza entre los productores. Estos cultivos no se fertilizan o se fertilizan muy poco, y los insumos para realizar el control de plagas y enfermedades es bajo. Los cultivos en esta categoría son huazontle, haba, rábano, betabel, y flores. En esta categoría la demanda de insumos va de \$5000 a \$20 000 pesos por hectárea y ciclo, por la duración corta de los cultivos.

Costo medio

Aquí se ubicó la mayoría de las hortalizas y algunas flores, ya que se requiere comprar semillas o plántulas cada dos o tres ciclos para evitar el deterioro genético, aunque en ocasiones se obtiene de cultivos anteriores. Esta categoría de cultivos utiliza cantidad mayor de fertilizantes e insumos para el control de plagas y enfermedades. La inversión requerida varía de 30 mil a 60 mil pesos por hectárea y ciclo

Costo alto

Los cultivos en esta categoría utilizan una cantidad mayor de insumos. La semilla es más cara o requiere un trabajo especial para su cultivo, como el caso del epazote y del ajo. La inversión es mayor a \$60 000 pesos por hectárea y ciclo. La cantidad de fertilizante que aplican los productores depende de la ganancia obtenida en el ciclo anterior (Cuadro 4). Cuando la ganancia es aceptable, los productores compran fertilizante químico y aplican al cultivo y también abono orgánico, o solo este último; pero si la ganancia es baja, o sufren pérdidas por precios bajos de productos o por siniestro de los cultivos, entonces gastan menos en la compra de fertilizantes y dan prioridad a la compra de semillas o plántulas, pago de jornales, compra de pesticidas para el control de plagas y enfermedades. Los agricultores no realizan análisis de suelo ni cuentan con asesoría técnica para la toma de decisiones sobre el manejo nutrimental de sus cultivos.

En los cultivos que tienen un costo bajo los productores aplican entre 0 a 100 kg de fertilizante por ha y se utilizan los más económicos (urea y sulfato de

The estimate considered costs of the seed or seedling; cost of fertilizers; products for the control of pests and diseases; and other foliar inputs and labor to carry out crop specific activities. We classified the costs into categories, according to input demand, as Low, Low-Medium, Medium, Medium-High, High.

Low cost

This category belongs to the crops for which it is not usually necessary to buy seeds or seedlings. Instead, they come from previous sowings, exchanges, or purchases at sales done by the producers. These crops are not, or very little fertilized; and the inputs for pest and disease control are low. Crops in this category are huazontle, broad bean, radish, beet, and cut flowers. The input demand ranges from \$5000 to \$20 000 MXN pesos per ha and cycle, due to the short duration of these crops.

Average cost

Most of the vegetables and some cut flowers fell in this group of crops. Because it is necessary to buy seeds or seedlings every two or three cycles to avoid genetic deterioration, although sometimes seeds are obtained from previous crops. This category of crops uses a more significant amount of fertilizers and inputs to control pests and diseases. The investment required varies from \$30 000 to \$60 000 MXN pesos per hectare and cycle.

High cost

Crops in this category use a more significant amount of inputs. The seeds are expensive, and plants require unique work for their cultivation, as in epazote and garlic. The investment is higher than \$60 000 MXN pesos per hectare and cycle. The amount of fertilizer applied by producers depends on profit from the previous cycle (Table 4). When the profit is acceptable, the producers buy chemical fertilizer or organic fertilizer and apply it to the crop. However, if the profit is low, or they suffer losses due to low prices of products or loss of crops, then they spend less money on the purchase of fertilizers. They give priority to the acquisition of seeds or seedlings, payment of wages, and purchase of pesticides for the control of pests and diseases. Farmers do not perform

Cuadro 4. Aproximación de la cantidad de fertilizante aplicada según la clasificación propuesta de demanda de insumos en los ejidos de Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás.

Table 4. Approximate amount of fertilizer applied according to the proposed classification of input-demand in the ejidos Santa María, San Hipolito, Candelaria and San Nicolas.

Demanda de insumos	Cantidad aplicada de fertilizante por ha [†]	Fuentes principales [‡]
Baja	0 - 100 kg	Urea, Sulfato de amonio
Media	300 - 500 kg	Urea, Sulfato de amonio, DAP, MAP, Fosfonitro,
Alta	500 - 800 kg	Nitrofoska (12-12-17) Mezclas locales ²

[†]Datos proporcionados en la encuesta socio-técnica. [‡]En las agroquímicas locales venden mezclas preparadas a granel y sin etiqueta, supuestamente diseñadas para diferentes cultivos. ♦ [‡]Data provided in the socio-technical survey. [‡]At local agrochemical stores sell ready-made mixes in bulk and without label, supposedly designed for different crops.

amonio). La cantidad aplicada y fuente de nutrientes usados se juzga deficiente porque no agrega todos los nutrientes que el cultivo demanda. En el caso de los cultivos de costo medio y alto las aplicaciones están en los intervalos de 300 a 500 y 500 a 800 kg ha⁻¹, respectivamente. Para cubrir la demanda nutricional de las plantas, los productores utilizan fertilizantes sólidos, que complementan con fertilizantes líquidos para incorporar micronutrientes.

Los productores no tienen un calendario establecido con anterioridad para definir el o los cultivos a sembrar ni consideran la rotación de los mismos. Para los autores no fue clara la forma en la cual los productores toman sus decisiones, pero se supone que en ello influyen consideraciones como: resultado del ciclo previo, demanda del mercado, disponibilidad de agua y capital disponible. Algo que sería muy conveniente es que especialistas en economía y desarrollo rural profundizaran en esta materia, y las autoridades sectoriales respectivas proporcionaran información oportuna sobre demanda y mercados potenciales que ayuden a los productores en pequeño a tomar decisiones acertadas, en función de su capacidad económica, del mercado y las necesidades regionales.

Clasificación de los patrones de cultivo

Como ya se señaló, en los ejidos se producen más de 30 cultivos diferentes (Cuadro 5) principalmente hortalizas y flores de corte. Los productores consideran que los patrones de cultivo están definidos por tres aspectos: 1) inversión requerida por el cultivo, 2)

soil analysis, nor do they have technical advice to make decisions about crop nutritional management.

The producers apply 0 to 100 kg of fertilizer per ha in crops with a low production cost; the cheapest fertilizers in the market are urea or ammonium sulfate. The amount applied and the source of nutrients used are insufficient because they fail to add all the nutrients that crop demands. In medium and high-cost crops, fertilizer applications range from 300 -500 kg ha⁻¹, to 500 - 800 kg ha⁻¹, respectively. To meet plant nutritional demand, producers use dry fertilizer sources, complemented with liquid fertilizers to incorporate micronutrients.

Producers do not have a previously established calendar to define the crop, or crops to be sown, nor do they consider their rotation. It was not clear to the authors how producers make their decisions, but we assumed that considerations such as the previous cycle results, market demand, water availability, and available capital influence decision making. It would be very convenient for specialists in economics and rural development to delve into this matter. The respective sectoral authorities should provide timely information on demand and potential markets that help small producers make the right decisions based on their economic capacity, markets, and regional needs.

Classification of cultivation patterns

As it was already mentioned, more than 30 different crops are produced in the ejidos (Table

Cuadro 5. Cultivos producidos en los ejidos de Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás, duración y demanda de insumos y de agua.**Table 5. Crops produced in the ejidos (Santa Maria, San Hipolito, Candelaria, and San Nicolas), culture duration, and demand for inputs and water.**

Cultivo	Duración del cultivo	Demanda de insumos	Demanda de agua
		Flores	
Alstromelia (<i>Alstromelia sp.</i>)	8 meses	Media	Media-Alta
Crisantemos (<i>Dendranthema sp.</i>)	7-11 meses	Media-Alta	Media-Alta
Nora (<i>Bellis sp.</i>)	1.5 - 2 a	Baja-Media	Media
Aster (<i>Aster ericoides</i>)	8-12 meses	Baja-Media	Media
Statice (<i>Limonium sp.</i>)	8-12 meses	Baja	Media
Clavel (<i>Dianthus caryophyllus L.</i>)	6-8 meses	Baja-Media	Media
Perrito (<i>Antirrhinum majus L.</i>)	6 meses	Baja-Media	Media
Cempasuchil (<i>Tagetes erecta L.</i>)	3 meses	Baja	Media
Terciopelo (<i>Celosia cristata.</i>)	3 meses	Baja	Media
Alhelí (<i>Matthiola incana</i>)	4 meses	Baja	Media
Nube (<i>Gypsophila paniculata</i>)	2.5 meses	Baja	Media
		Hortalizas	
Ajo (<i>Allium sativum</i>)	5 meses	Alta	Alta
Cebolla (<i>Allium cepa</i>)	3 meses	Alta	Alta
Apio (<i>Apium graveolens</i>)	3 meses	Media	Alta
Cilantro (<i>Coriandrum sativum</i>)	2.5 meses	Media	Alta
Perejil (<i>Petroselinum crispum</i>)	2.5 - 4 meses	Media	Alta
Lechuga (<i>Lactuca sativa</i>)	2.5 meses	Media	Alta
Manzanilla (<i>Chamaemelum nobile</i>)	2.5 meses	Baja	Alta
Brócoli (<i>Brassica oleracea var Italica</i>)	2.5 meses	Media	Alta
Col (<i>Brassica oleracea var. Capitata</i>)	3.5 meses	Media	Alta
Rábano (<i>Raphanus sativus</i>)	40 d	Baja	Alta
Nabo o Vaina (<i>Brassica campestris</i>)	3 meses	Baja	Media-Alta
Acelga (<i>Beta vulgaris</i> subsp. <i>cicla</i>)	4 meses	Baja	Alta
Betabel (<i>Beta vulgaris L.</i>)	2.5 meses	Media	Alta
Espinaca (<i>Spinacea oleracea L.</i>)	40 d	Baja	Alta
Huauzontle (<i>Chenopodium nuttalliae</i>)	2.5 meses	Baja	Media-Alta
Epazote (<i>Dysphania ambrosioides</i>)	10 - 12 meses	Alta	Alta
Calabacita (<i>Cucurbita pepo L.</i>)	3 meses	Media-Alta	Alta
Chícharo (<i>Pisum sativum</i>)	4 meses	Media	Alta
Ejote (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	3.5 meses	Baja-Media	Alta
Haba (<i>Vicia faba</i>)	4 meses	Baja	Media-Alta
		Granos y forrajes	
Maíz (<i>Zea miz</i>)	5 meses	Baja-Media	Media-Alta
Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	3-5 a	Baja-Media	Media-Alta

disponibilidad de agua, y 3) comercialización. Con base en lo anterior los patrones de cultivo se clasificaron en: 1) flor de corte, 2) hortalizas de ciclos continuos, y 3) hortalizas con descanso en temporada de secas.

5), mainly vegetables and cut flowers. Producers consider that cultivation patterns are defined by three aspects: 1) investment required by cultivation, 2) water availability, and 3) marketing. Based on the above, we classified the cultivation patterns into 1) cut flowers, 2) vegetables in continuous cycles, and 3) vegetables with land rest in the dry season.

Flor de corte

En este grupo se clasificaron parcelas con 50% o más del área ocupada para flor de corte. Este patrón se caracteriza porque las parcelas se subdividen para cultivar diferentes flores y por dejar espacio para la siembra de hortalizas con demanda baja en insumos. Algunas parcelas tienen hasta siete divisiones con flores diferentes, lo que genera gran diversidad en los cultivos. El uso de maquinaria agrícola es escaso en este patrón de cultivo, y solo se usa tractor para rasurar o subsolar cuando el suelo está compactado, lo que ocurre menos de una vez al año. Las labores de nivelación, trazo de surco y aporcado se realizan con tracción animal o motocultor. El uso menor del tractor se debe a que el ciclo de cultivo de las flores de corte es más largo y se privilegia el uso de la tracción animal porque facilita el trabajo y las labores agrícolas.

Otra característica de este patrón de cultivo es el uso de agua residual para el riego. Según la encuesta socio-técnica, esto ocurre principalmente en el ejido de Candelaria y en menor medida en San Nicolás y San Hipólito. En Santa María no se usa agua residual (Cuadro 6). Los agricultores consideran que el agua residual agrega nutrientes al cultivo de flores, porque la cantidad de fertilizante que usan es menor que en las hortalizas. Sin embargo, el uso de fertilizantes no es uniforme entre los productores.

Un caso digno de resaltar es el de la flor Nora, en su mayoría producida como cultivo único en parcelas sin subdivisiones, porque demanda poca agua y se recupera rápido después de una helada. Una vez en producción puede cosecharse cada tercer día, y ello permite la generación de ingresos continuos para el productor. Este tipo de conocimiento solo es posible adquirirlo con la participación activa de los productores, ya que por lo común escapa a la observación del técnico.

Hortalizas de ciclos continuos

El patrón de siembra continua de hortalizas se caracteriza porque los residuos de la cosecha previa se incorporan mediante el paso de rastra, se surca y se vuelve a sembrar o trasplantar otra hortaliza, de inmediato. Ello requiere el uso intensivo de maquinaria agrícola (tres o cuatro veces al año) para realizar esas labores, por lo que las parcelas no se subdividen

Cut flower

This group includes plots with 50% or more of the area occupied by cut flowers. This group main characteristic is the subdivision of the plots to grow different cut flowers, leaving some space for planting vegetables with low demand for inputs. Some plots have up to seven divisions with different cut flowers, which creates diversity in crop availability. The use of agricultural machinery is scarce in this cropping pattern, and a tractor is used only for dragging or subsoiling when the soil is compacted, which occurs less than once a year. Animal traction or a walking tractor for leveling, furrow tracing, and hilling, are the standard. Tractor lesser use is because the crop cycle of cut flowers is long, and animal traction is favored because it facilitates working and agricultural labors.

Another characteristic of this cropping pattern is the use of wastewater for irrigation. According to the socio-technical survey, this occurs mainly in Ejido La Candelaria and, to a lesser extent, in Ejido San Nicolás and Ejido San Hipólito. Whilst in Ejido Santa Maria, no wastewater is used (Table 6). Farmers consider that wastewater adds nutrients to cut flower crops because the amount of fertilizer they use is less than in vegetables. However, the use of fertilizers is not uniform among producers.

A case worth mentioning is that of the Nora flower, mostly produced as a single crop in plots without subdivisions because it demands little water, and recovers quickly after a frost. Once in production, it can be harvested every third day, allowing the generation of continuous income for the producer. This type of knowledge can only be acquired with producers active participation since it usually eludes observation by a technician.

Vegetables for continuous cycles

The vegetables continuous planting pattern is characterized by incorporating the previous harvest residues by harrowing, furrowing, and sowing or transplanting another vegetable immediately. This type of management requires the intensive use of agricultural machinery (three or four times per year) to carry out these labors, so the plots are not subdivided to facilitate machinery use. According to the socio-technical survey, 70% of the farmers do not

Cuadro 6. Uso de agua residual (% del total) para cultivos de flor en los ejidos de Santa María, San Hipólito, Candelaria y San Nicolás.

Table 6. Use of wastewater (% of total) for cut flowers crops in the ejidos Santa Maria, San Hipolito, Candelaria and San Nicolas.

% de agua residual	Candelaria Purificación		San Nicolás Zoyapetlayuca		San Hipólito Xochilténango	
	Fr	%	Fr	%	Fr	%
0 %	1	5	-	-	-	-
10%	-	-	6	86	-	-
20-30%	6	32	1	14	5	100
>50%	12	63	-	-	-	-

Fr: Frecuencia, según las encuestas levantadas. ♦ Fr: Frequency, according to the applied surveys.

para facilitar el uso de maquinaria. De acuerdo con la encuesta socio-técnica, 70% de los agricultores no siembran la misma hortaliza dos veces seguidas en la misma parcela, porque en la segunda ocasión las plantas se enferman o son susceptibles al ataque de plagas. Pero sí permite la siembra de hortalizas de la misma familia. Por lo que los productores consideraron que este es el patrón de cultivo que utiliza más insumos agrícolas y agua, porque las hortalizas son más demandantes y hay más ciclos por año.

El impacto de este sistema continuo de producción, con varios ciclos por año, debe calificarse técnicamente como más demandante de insumos y energía que los ya descritos; en consecuencia, si no se hace una reposición oportuna de los nutrientes extraídos, se infiere que habrá una pérdida de la calidad química del suelo, en particular, de la materia orgánica. Esto nos lleva a considerar que los aspectos estructurales del suelo, en los cuales interviene específicamente esta última, como son estructura, densidad aparente, capacidad de retención de humedad, deben considerarse al generar indicadores e índices de calidad del suelo, además de las variables nutrimentales.

Hortalizas con descanso en temporada seca

En este patrón de cultivo la limitación principal es el agua de riego o residual. Las parcelas solo se cultivan en época de lluvias, de mayo a octubre, y con especies poco demandantes de insumos, por tratarse de una inversión insegura. En algunos años se han sembrado dos ciclos cortos de hortalizas y luego maíz,

plant the same vegetable twice subsequent times on the same plot because the plants become ill or are susceptible to attack by pests on the second occasion. However, it does allow the planting of vegetables from the same family. Therefore, the producers considered that this cultivation pattern uses more agricultural inputs and water because vegetables are more demanding than cut flowers, and more cycles per year can occur.

With several cycles per year, the impact of a continuous production system qualifies technically as more demanding on inputs and energy than those already described. Consequently, if a timely replacement of the extracted nutrients does not occur, it can be inferred that there will be losses in soil chemical quality, particularly organic matter. This leads us to consider that among those structural factors of the soil in which multiple crops per year intervene, organic matter does it mainly on the physical aspects such as structure, apparent density, moisture retention capacity. Thus, organic matter must be a consideration when generating indicators and soil quality indices, in addition to the nutritional variables.

Vegetables with land rest during the dry season

In this cropping pattern, the main limitation is the restriction of irrigation or residual water for irrigation. Cultivation of plots occurs in the rainy season, this is, from May to October; and with species with little demand for inputs, due

o la parcela se subdivide para tener las dos opciones y dejarla descansar durante la época seca. Cada año antes de la temporada de lluvias se prepara el terreno con maquinaria agrícola y se realiza el paso de rastra, barbecho (y siembra, para el caso del maíz); la nivelación y el trazado de surco se realizan con tracción animal. Este patrón de cultivo se encuentra principalmente en el ejido de San Nicolás y en menor medida en San Hipólito, por tener menor disponibilidad de agua.

CONCLUSIONES

La integración del conocimiento de los productores en pequeño con los conocimientos técnicos-científicos y la información histórica antigua y reciente, permitió tener una visión de la realidad en la cual se desarrollan las actividades de producción en los ejidos de la región de Tepeaca, Puebla. Por más de 500 años se han cultivado hortalizas con riego en el ejido San Hipólito, y maíz y trigo en los ejidos Santa María, Candelaria y San Nicolás. Los ejidos se constituyeron a principios del siglo XX y hasta su octava década del se cultivó “milpa”.

La producción de hortalizas y flores inició cuando el Estado perforó 16 pozos para riego. La apertura de estos pozos cambió los esquemas de producción e influye en la selección de las especies cultivadas y en su impacto en la demanda de agua. Ahora se cultivan en pequeñas unidades pluri activas (< 5 ha), con asistencia técnica y créditos escasos, más de 30 hortalizas y flores. El agua extraída de los pozos no cubre la demanda agrícola y se complementa con aguas residuales municipales o de la Barranca del Águila. Y una parte del agua extraída de los pozos se comercializa con fines no agrícolas.

El uso de agua residual causa daño en algunos cultivos por contaminación con residuos urbanos y ausencia de tratamiento. La integración de los conocimientos empíricos de los productores con los técnico-científicos, contribuyó a establecer tres tipos de tierras en la zona de estudio: Oscuros, Nextlales y Arenosos-Fuertes. Por esta clasificación se rigen los productores para tomar decisiones acerca del uso de las tierras más aptas en sus pequeñas propiedades. Los productores no entienden la clasificación oficial de suelos del INEGI cuya escala de reporte es adecuada con fines normativos.

Los patrones de cultivo identificados fueron: flor de corte, hortalizas de ciclos continuos, y hortalizas con

to investment uncertainty. In some years, farmers sow two short cycles with vegetables, followed by planting maize; or does subdivide the plot in order to have both options (sowing one part of the plot with maize and the other with vegetables) followed by land rest during the dry season. Before the rainy season, land preparation with agricultural machinery for harrowing (and immediately planting in the case of maize) is made. Farmers use animal traction for leveling and furrowing. This cultivation pattern is mainly found in Ejido San Nicolas, and to a lesser extent in Ejido San Hipolito, due to their lower water availability.

CONCLUSIONS

The integration of producers knowledge and technical-scientific knowledge, with the old and recent historical information allowed the authors to have a vision of the reality in which production activities are developed in ejidos of Tepeaca, Puebla (Mexico). For more than 500 years, irrigated vegetables have been grown in Ejido San Hipolito; maize and wheat in Ejido Santa Maria, Candelaria, and San Nicolas. In these ejidos, some years later 1900 and up to the eighties of last 20th century, “milpa” was the main cultivation system.

The production of vegetables and cut flowers began when the State drilled 16 wells for irrigation. Thus, traditional production patterns changed, influenced the selection of cultivated species, and increased water demand. More than 30 vegetables and cut flowers are grown in small multi-purpose units (< 5 ha), with little technical assistance and small credits. Water from wells does not cover agricultural demands, and it requires supplementation with wastewaters from the municipality or the ravine Barranca del Aguila. However, part of the water drawn from the wells is sold for non-agricultural purposes.

The use of wastewater causes damage to some crops due to contamination with urban waste, and lack of treatment. The integration of empirical knowledge of the producers with technical-scientific knowledge, contributed to establish three types of lands in the study area: Dark (Obscure), Nextlales and Strong sands. Producers base their decision making on this lands classification, about the use of the most suitable lands at their small properties. Producers do not understand the official INEGI

descanso en temporada de secas. Los suelos de estos ejidos constituyen un registro histórico único en el país. Y muestran cómo la actividad antrópica afecta las características y la dinámica de los procesos edáficos con distintas intensidades. Estos fenómenos deben investigarse por medio de indicadores de calidad apropiados. La pérdida rápida de la calidad del suelo podría dejar sin tierra y sin trabajo a muchos productores, y esto es algo de muy importante y necesaria consideración.

LITERATURA CITADA

- Arvizu B., E., L. Jiménez S., M. A. Jiménez V., A. Quispe L., M. R. Villa I., J. A. Ávila D. 2014.
- Análisis de producción y comercialización de hortalizas: caso del mercado de Huixcolotla, Puebla, Rev. Mex. Cienc. Agríc. 5: 687-994.
- Barrera-Bassols, N., and J. A. Zinck. 2003. Ethnopedology: a worldwide view on the soil knowledge of local people. Geoderma 111: 171-195.
- Barrios, E., R. J. Delve, M. Bekunda, J. Mowo, J. Agunda, J. Ramisch, and R. J. Thomas. 2006. Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. Geoderma. 135: 248-259.
- Bünemann, E. K., G. Bongiorno, Z. Bai, R. E. Creamer, G. De Deyn, R. de Goede, L. Fleskens, V. Geissen, T. W. Kuyper, P. Mäder, M. Pulleman, W. Sukkel, J. W. Van Groenigen, and L. Brussaard. 2018. Soil quality- A critical review. Soil Biol. Biochem. 120: 105-125.
- CONAGUA. 2018. Catálogo del archivo histórico del agua. Correspondencia relativa a solicitud de concesión de aguas para riego y enlame de tierras ejidales. Expediente 13467. México. https://sideco.conagua.gob.mx/sideco_consulta/ (Consulta: mayo 2019).
- CONAGUA. 2019. Registro Público de Derechos de Agua. Consulta a la base de datos del REPGA. México. <https://app.conagua.gob.mx/consultarepda.aspx> (Consulta: mayo 2019).
- ESRI. 2017. Software ArcGIS 10.5. Redlands, CA. USA.
- Grosso, J. C. 1996. Indios, campesinos y mercado. La región de Puebla a finales del siglo XVIII. El Colegio de México 46: 245-278.
- IICA. 2013. Informe anual 2012 del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Vol. 616. México.
- INEGI. 2000. Clima, Escala 1:1,000,000. Serie I. Dirección General de Geografía, INEGI. México.
- INEGI. 2007. VIII Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. Dirección General de Estadísticas Económicas. México.
- INEGI. 2011. Carta Edafológica, Serie II. E14-12, Escala 1:250,000. Dirección General de Geografía, INEGI. México.
- Karlen, D. L., C. A. Ditzler, and S. S. Andrews. 2003. Soil quality: Why and how? Geoderma 114: 145-156.
- Lugo-Morin, D. R., J. Ramírez-Juárez, J. A. Méndez-Espinoza, y B. Peña-Olvera. 2010. Redes sociales asimétricas en el sistema hortícola del valle de Tepeaca, México. Economía, Sociedad y Territorio 10: 207-230.

soil classification, whose reporting scale is adequate roughly for National regulatory purposes.

Identified cultivation patterns were: cut flowers, vegetables in continuous cycles, and vegetables followed by land rest. Soils in these Ejidos form a unique historic record in our country. They show how anthropic activities affect soils characteristics and dynamics of edaphic processes at different intensities. This phenomena should be further investigated through appropriate quality indicators. Rapid loss of soil quality would leave many producers without lands and labour. This fact is very important and worthy of consideration.

—End of the English version—



- Martínez, H. 1984. Tepeaca en el Siglo XVI. Tenencia de la Tierra y Organización de un Señorío. México. CIESAS. (Ediciones de la Casa Chata, 21). 230 p.
- Medina, J. M., N. G. Peñaflares R., and J. E. Silverstein. 2016. The ancient hydraulic catchment systems of Tepeaca-Acatzingo archeological zone, Puebla, Mexico. In: Angelakis, A. N., E. Chiotis, S. Eslamian, and H. Weingartner. Underground Aqueducts Handbook. CRC Press. pp: 475-483.
- Montero G., I. A. 2008. Mapa de Cuauhtinchan II. Entre la ciencia y lo sagrado, Mesoamerican Research Foundation, Puebla, México. 270 p.
- Ortiz S., C. A., D. Pájaro H., y V. M. Ordaz Ch. 1990. Manual para la cartografía de clases de tierras campesinas. Serie de Cuadernos de Edafología 15. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México. 62 p.
- Ortiz S., C. A., and M. C. Gutiérrez C. 2001. Mexican ethnopedology: the experience in soil mapping. Science and tradition: Roots and wings for development. Royal Academy of Overseas Sciences. Brussels, Belgium. Pp: 107-136.
- RAN (Registro Agrario Nacional). 2018. Padrón e Historial de Núcleos Agrarios PHINA. <http://www.ran.gob.mx/ran/index.php/sistemas-de-consulta/phina> (Consulta: julio 2018).
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000, México.
- Vélez P., R. M. 1993. Los orígenes de las haciendas en Puebla. Revista de la Universidad de México. México. Agosto (Número Especial): 18-21.
- Vergara, S., M. A., y J. D. Etchevers B. 2004. Indicadores de calidad del suelo en laderas de la Sierra Norte (Oaxaca). In: García M., A. J., M. de J. Ordoñez, y M. Briones-Salas (eds). Biodiversidad de Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México, Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza y World Wildlife Fund. México D.F. pp: 585-602.
- Yanez D., G. 1991. Espacios Urbanos en la Región de Puebla-Tlaxcala. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla. 497 p.

CONDICIONES LABORALES Y VALORACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD SOCIAL EN EMPRESAS AGRÍCOLAS DEL MUNICIPIO DE ELOTA, SINALOA, MÉXICO

LABOR CONDITIONS AND SOCIAL RESPONSIBILITY ASSESSMENT AT AGRICULTURAL COMPANIES IN THE MUNICIPALITY OF ELOTA, SINALOA, MÉXICO

Belem Dolores **Avendaño Ruiz**¹, Karina Adalessa **Bañuelos-Torrontegui**², Federico **Martínez-Carrasco Pleite**³

¹Facultad de Economía y Relaciones Internacionales, Universidad Autónoma de Baja California. Calzada Universidad #14418, Parque Internacional Industrial Tijuana, 22427 Tijuana, B.C., México. (b_avendano@uabc.edu.mx). ²Facultad de Economía y Relaciones Internacionales, Universidad Autónoma de Baja California. México. (karinaadalessa@gmail.com). ³Departamento de Economía Aplicada de la Universidad de Murcia, España. (femartin@um.es).

RESUMEN

La responsabilidad social empresarial (RSE) se conceptualiza como un estándar que facilita la atención de problemas de impacto global, entre ellos la mejora de las condiciones laborales, la protección de los derechos de los trabajadores, la no discriminación o la prohibición del trabajo infantil. Estas metas se incluyen también en el objetivo No.8 de la Agenda 2030, dedicado a las condiciones decentes de trabajo y al crecimiento económico. La medición de la RSE desde el punto de vista de los trabajadores agrícolas como grupo de interés se aborda en la literatura de forma escasa. Por lo común el estudio se centra en la imagen percibida de los niveles de responsabilidad de las empresas, por los consumidores finales. El objetivo de este estudio fue medir la percepción de las acciones de responsabilidad social implementadas por las empresas locales, con énfasis en las prácticas laborales y los derechos humanos de la población trabajadora del municipio de Elota, Sinaloa, México; uno de los enclaves agrícolas más importantes del país. Un cuestionario se aplicó a 400 personas y por medio de un análisis multivariante de la información y la prueba F-Snedecor se logró contrastar la hipótesis del reconocimiento que la población trabajadora otorga a las acciones de responsabilidad social de las empresas locales. Un nivel de satisfacción elevado y una imagen social positiva se encontraron, acerca de las prácticas realizadas por las empresas del sector agrícola, en comparación con las de otros sectores y actividades productivas. Los jornaleros agrícolas, que representan el 58.7% de la población encuestada, consideran que las empresas del sector agrícola cumplen mejor con la contratación y prestaciones laborales

ABSTRACT

Corporate social responsibility (CSR) is conceptualized as a standard that provides attention to problems of global impact, including the improvement of working conditions, the protection of workers' rights, non-discrimination and the prohibition of child labor. These goals are also included in the objective Nu.8 of the 2030 Agenda, dedicated to decent working conditions and economic growth. The measurement of CSR from the point of view of agricultural workers as a focus group is scarcely addressed in the literature. Most commonly, the study is limited to the perceived image of corporate responsibility levels by end consumers. The objective of this study was to measure the perception of social responsibility actions implemented by local companies, emphasizing labor practices and human rights of the working population of the municipality of Elota, Sinaloa, Mexico; one of the most important agricultural spots in the country. A survey was conducted on 400 people and by means of a multivariate analysis of the information and the F-Snedecor test, it was possible to contrast the hypothesis of the acknowledgement the working population gives to the social responsibility actions of local companies. A high level of satisfaction and a positive social image of the practices carried out by the companies of the agricultural sector was found, compared to those of other sectors and productive activities. Agricultural laborers, who represent 58.7% of the surveyed population, consider that companies in the agricultural sector comply more efficiently with hiring and labor benefits established by law, compared to workers in other activities. In the area of human rights, the positive perception of agricultural laborers regarding actions related to non-discrimination and the fight against child labor stands out.

* Autor para correspondencia ♦ Author for correspondence.
Recibido: octubre, 2020. Aprobado: febrero, 2021.
Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* **55**: 177-194. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.47163/agrociencia.v55i2.2394>

marcadas por ley, en comparación con los trabajadores que desarrollan otra actividad. En el ámbito de los derechos humanos destaca la percepción positiva de los jornaleros agrícolas respecto a las acciones en torno a la no discriminación y la lucha contra el trabajo infantil.

Palabras claves: Responsabilidad Social Empresarial, jornaleros agrícolas, condiciones laborales, percepción laboral, actividad agrícola.

INTRODUCCIÓN

El tema de la Responsabilidad Social Empresarial o Corporativa (RSE o RSC)⁴ ha tomado auge en el mundo en los últimos 30 años, promovido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE), la Organización Internacional del Trabajo (OIT), la Unión Europea y un número creciente de entidades privadas que la impulsan. Entre ellas, las cadenas globales de suministro que fomentan entre las empresas la alineación de su estrategia competitiva con los objetivos del desarrollo sostenible establecidos por el Pacto Global (ONU, 2020). Los ejes del Pacto Global (derechos humanos, normas laborales, medio ambiente y corrupción) coinciden con parte de las materias y asuntos que proponen evaluar diversos estándares de responsabilidad social.

Algunos de los estándares principales son, la norma SA 8000, publicada por la Social Accountability International (SAI); la norma AA1000 del Institute for Social and Ethical Accountability (ISEA); la norma UNE165010:2009 EX de la Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR) (Avenida *et. al.*, 2015); la CEAR (Certificación Empresa Agrícola Responsable) (AHIFORES, 2017). También la ISO 26 000 de Responsabilidad Social (ISO, 2010) de la Organización Internacional de Normalización (ISO por sus siglas en inglés, International Organization for Standardization), integrada por siete ejes o ámbitos de análisis: gobernanza de la organización, derechos humanos, prácticas laborales, medio ambiente, prácticas justas de operación, asuntos

Key words: Corporate Social Responsibility, agricultural laborers, working conditions, labor perception, agricultural activity.

INTRODUCTION

The issue of Corporate Social Responsibility (CSR)⁴ has grown in the world over the last 30 years, promoted by the United Nations (UN), the Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), the International Labor Organization (ILO), the European Union and by a growing number of private entities. Among these, some global supply chains that encourage companies to align their competitive strategy with the sustainable development objectives established by the Global Compact (UN, 2020). The Global Compact core areas (human rights, labor standards, the environment and corruption) match some of the subjects and issues proposed for evaluation of various social responsibility standards.

Some of the main standards are the SA 8000 standard, published by Social Accountability International (SAI); the AA1000 standard of the Institute for Social and Ethical Accountability (ISEA); the UNE165010:2009 EX standard of the Spanish Association for Standardization and Certification (AENOR) (Avenida *et. al.*, 2015); the CEAR (Responsible Agricultural Enterprise Certification) (AHIFORES, 2017). Also, the ISO 26 000 for Social Responsibility (ISO, 2010) of the International Organization for Standardization (ISO), integrated by seven axes or areas of analysis: organizational governance, human rights, labor practices, environment, fair operating practices, consumer affairs and active participation, and community development. This research focused on the study of labor practices and human rights.

A general definition of CSR includes the responsibility of an organization or company for the impact of its activities on society and the environment. Along with an ethical behavior that contributes to sustainable development, considers the expectations of its stakeholders, complies with applicable legislation and is consistent with

⁴En este documento se optó por el término Responsabilidad Social Empresarial y no Responsabilidad Social Corporativa porque en México, la literatura y los medios informativos manejan el primero. Aunque se considera que ambos son sinónimos, la segunda se aplica a las compañías de gran facturación y tamaño empresarial. ♦ In this document, the term Corporate Social Responsibility was chosen instead of Company Social Responsibility because in Mexico, the literature and the media use the former. Although both are considered to be synonyms, the latter is referred to companies of large turnover and business size.

de consumidores y participación activa, y desarrollo de la comunidad. Esta investigación se centró en el estudio de los ejes de prácticas laborales y derechos humanos.

Una definición general de RSE incluye la responsabilidad de una organización o empresa por el impacto en la sociedad y el ambiente de las actividades que realiza. Junto con un comportamiento ético que contribuya al desarrollo sostenible, considere las expectativas de sus partes interesadas, cumpla con la legislación aplicable y sea coherente con la normativa internacional (ISO, 2010). Avendaño *et. al.* (2015) y Lizcano-Prada y Lombana (2018) coincidieron en que la adopción de este tipo de estándares, de cumplimiento voluntario, influye de manera favorable en la ventaja competitiva de las empresas. A través de mejorar su reputación, la capacidad de atracción y retención de trabajadores, miembros o usuarios; motivar el compromiso y productividad de los empleados; y mejorar la percepción por los agentes económicos y la comunidad donde operan.

Las empresas que no implementan programas de responsabilidad social tienden a ser desplazadas a mercados de exigencia menor, porque este estándar tiene cada vez mayor demanda por las cadenas globales de suministro, para integrar a las empresas agrícolas locales a los mercados internacionales de valor alto. Para las empresas agrícolas mexicanas la implementación de estándares y prácticas de RSE no sólo representa una estrategia para la conquista de mercados, sino una oportunidad para alcanzar las metas de competitividad a partir de la inclusión en su operación de las perspectivas ambientales, sociales y económicas; áreas que antes le eran ajenas (Avendaño *et. al.*, 2015).

En la actualidad, la RSE se podría interpretar también como un medio para atender las exigencias de la integración económica regional, establecidas en el Capítulo 23 (Trabajo), del Tratado entre los Estados Unidos de América, los Estados Unidos Mexicanos y Canadá (T-MEC) en vigor desde el 1o. de julio de 2020. En ese capítulo, las partes reconocen la vulnerabilidad de los trabajadores migrantes respecto a las protecciones laborales. También sientan las bases para el reconocimiento de sus derechos laborales promovidos por la OIT (1998) y contenidos en la norma ISO 26 000 (OEA, 2020).

La mejora de las condiciones laborales de los trabajadores agrícolas en México es una tarea inconclusa. El gobierno federal implementó en 1982, en

international standards (ISO, 2010). Avendaño *et. al.* (2015) and Lizcano-Prada and Lombana (2018) concurred that the adoption of this type of standards, of voluntary compliance, favorably influences companies competitive advantage. Through improving their reputation, the ability to attract and retain workers, members or users; motivating the commitment and productivity of employees; and improving the perception by economic agents and the community where they operate.

Companies that do not implement social responsibility programs tend to be displaced to less demanding markets, because this standard is increasingly in demand by global supply chains, in order to integrate local agricultural companies into high-value international markets. For Mexican agricultural companies, the implementation of CSR standards and practices not only represents a strategy for conquering markets, but also an opportunity to achieve competitiveness goals by including environmental, social and economic perspectives in their operations; areas that were previously alien to them (Avendaño *et. al.*, 2015).

Currently, CSR could also be interpreted as a means to meet the requirements of regional economic integration, as established in Chapter 23 (Labor) of the Treaty between the United States of America, the United Mexican States and Canada (T-MEC) in force since July 1, 2020. In that chapter, the parties recognize the vulnerability of migrant workers respect to labor protections. They also lay the groundwork for the recognition of their labor rights as promoted by the ILO (1998) and contained in the ISO 26 000 standard (OEA, 2020).

Improving the working conditions of agricultural workers in Mexico is an unfinished task. In 1982, the federal government, in coordination with agricultural entrepreneurs in Sinaloa, implemented the first program to address the health and welfare needs of agricultural day laborers arriving in the state: el Programa de Desarrollo Social para Jornaleros en los Valles de Sinaloa (PRODESJA). This action became official in Mexico in 1990, as Programa Nacional con Jornaleros Agrícolas (PRONJAG). In 2001, they changed its name to Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas (PAJA), and this ended in 2018; due to the lack of allocation of federal resources (CEDRSSA, 2019).

According to the National Evaluation Council (CONEVAL, 2018), in its 37 years of life the PAJA

coordinación con los empresarios agrícolas de Sinaloa, el primer programa para la atención de las necesidades de salud y bienestar de los jornaleros agrícolas que llegaban a la entidad: el Programa de Desarrollo Social para Jornaleros en los Valles de Sinaloa (PRO-DESJA). Esta acción se volvió nacional en 1990, como Programa Nacional con Jornaleros Agrícolas (PRONJAG). En 2001 cambió de nomenclatura a Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas (PAJA), y concluyó en 2018 por la falta de asignación de recursos federales (CEDRSSA, 2019).

Según el Consejo Nacional de Evaluación (CONEVAL, 2018), en sus 37 años de vida el PAJA no alcanzó a transformar la realidad de los jornaleros agrícolas por su atención limitada al 1.7% de la población objetivo estimada en 6.5 millones en 2017. De acuerdo con COLMEX (2017), Posadas (2018) y CEDRSSA (2019), la situación de invisibilidad de los jornaleros agrícolas se afirma al persistir condiciones laborales inadecuadas como salarios bajos, inestabilidad en la duración de la contratación, protección social nula y exposición alta a riesgos de salud y seguridad en el trabajo.

No obstante el abandono del Estado mexicano a la atención de los jornaleros agrícolas, las acciones para mejorar las condiciones laborales de los trabajadores se mantuvieron vigentes por organizaciones del sector privado. Empresas agrícolas de Sinaloa pusieron en marcha iniciativas para atender la problemática laboral, basadas en esquemas de inocuidad y responsabilidad social, y desarrollaron el estándar Eleven Rivers en 2009 (Eleven Rivers, 2020). Organizaciones de productores y empresas agrícolas de México, que integraron la Alianza Hortofrutícola Internacional para el Fomento de la Responsabilidad Social, A.C. (AHIFORES) establecida en 2015, diseñaron otro estándar privado de RSE.

En 2019 la Alianza presentó la Certificación Empresa Agrícola Responsable (CEAR) con un diseño específico para empresas mexicanas en la actividad agrícola que, con la entrada en vigor del T-MEC, se dió a la tarea de rediseñar y publicar el estándar DEAR T-MEC (Empresa Agrícola Responsable). Este estándar es una herramienta de autoevaluación del cumplimiento de las obligaciones laborales alineadas al tratado vigente (AHIFORES, 2020). De esta forma se observa que en México, el sector privado lidera los esfuerzos para la implementación de estándares de RSE, ante el rezago del sector público

failed in transforming the reality of agricultural day laborers because of its limited attention to 1.7% of the target population, estimated at 6.5 million in 2017. According to COLMEX (2017), Posadas (2018), and CEDRSSA (2019), the situation of invisibility of agricultural day laborers is confirmed by the persistence of inadequate working conditions such as low wages, instability in the duration of hiring, no social protection and high exposure to occupational health and safety risks.

Despite the Mexican government abandonment of agricultural day laborers, actions to improve the labor conditions of workers were maintained by private sector organizations. Agricultural companies in Sinaloa launched initiatives to address labor issues, based on food safety and social responsibility schemes, and developed the Eleven Rivers standard in 2009 (Eleven Rivers, 2020). Producer organizations and agricultural companies in Mexico, which formed the International Horticultural and Fruit Alliance for the Promotion of Social Responsibility, A.C. (AHIFORES), established in 2015, designed another private CSR standard.

In 2019, the Alliance presented the Responsible Agricultural Company Certification (CEAR) with a specific design for Mexican companies in the agricultural activity that, with the entry into force of the T-MEC, undertook the task of redesigning and publishing the DEAR T-MEC (Responsible Agricultural Company) standard. This standard is a tool for self-assessment of compliance with labor obligations aligned with the current treaty (AHIFORES, 2020). And it shows that in Mexico, the private sector is leading efforts to implement CSR standards, given the public sector lag in designing effective policies to improve working conditions, and guarantee the human rights of agricultural workers.

In Mexico, Sinaloa is the entity that receives the largest number of agricultural laborers registered by the Mexican Social Security Institute (IMSS) as temporary farm workers. Of the 305 982 temporary farm workers benefited with entitlement in 2019 by the Institute, the state received 22% (IMSS, 2019). In addition to being the main recipient of farm workers, Sinaloa is also the main agricultural producer in Mexico. In 2019, it generated 16.5% of the national value of agricultural production, which amounted to \$350 352.43 million pesos MXN, equivalent to \$17 111.06 million USD⁵ (SIAP, 2020).

para diseñar políticas de atención efectivas para mejorar las condiciones laborales y garantizar los derechos humanos de los trabajadores agrícolas.

En México, Sinaloa es la entidad que recibe el número mayor de jornaleros agrícolas registrados por el Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS) como trabajadores eventuales del campo. De los 305 982 trabajadores eventuales del campo beneficiados con derecho-habiente en 2019 por el Instituto, el estado recibió al 22% (IMSS, 2019). Además de ser el receptor principal de trabajadores del campo, Sinaloa es también el principal productor agrícola de México. En 2019 generó 16.5% del valor nacional de la producción agrícola que ascendió a \$350 352.43 millones de pesos MXN, equivalentes a \$17 111.06 millones de USD⁵ (SIAP, 2020).

En Elota, el principal bien producido en términos de superficie sembrada es el grano de maíz que en 2019 cubrió 47% de las 38 719 hectáreas sembradas; el chile verde participó con 2.4%, el tomate con 4% y el pepino con 1.5%. La superficie sembrada de hortalizas es reducida, pero su importancia radica en la generación de valor que en ese mismo año, fue \$2 548.66 millones de pesos MXN, equivalentes a \$124.48 millones de USD, de los cuales chile verde, tomate y pepino aportaron 65%, el grano de maíz participó con 27%, y el 8% correspondió a ajonjolí, berenjena, calabacita, ejote y algunos forrajes como grano de sorgo y escobero (SIAP, 2020).

A nivel estatal, Elota ocupa el tercer lugar en valor de la producción de estos bienes agrícolas, solo después de Culiacán y Navolato. Lo cual generó la motivación para realizar este trabajo de campo, a través del levantamiento de encuestas para determinar si las actividades de RSE de las empresas ubicadas en el municipio de Elota han cambiado la percepción que de ellas tiene la población trabajadora en cuanto a sus condiciones laborales. Para ello el objetivo fue medir sus niveles de satisfacción, centrando el análisis en sólo dos ejes de la ISO 26 000, derechos humanos (DH) y las prácticas laborales (PL). La hipótesis fue que la población trabajadora reconoce las acciones de responsabilidad social de las empresas en las áreas de prácticas laborales y derechos humanos, con una

In Elota, the main good produced in terms of area planted is corn grain, which in 2019 covered 47% of the 38 719 hectares planted; green chili contributed with 2.4%; tomato with 4%; and cucumber with 1.5%. The area planted with vegetables is small, but its importance lies in the generation of value that was \$2 548.66 million MXN pesos in that same year, equivalent to \$124.48 million USD, of which green chili, tomato and cucumber contributed 65%, corn grain 27%, and 8% corresponded to sesame, eggplant, zucchini, green beans and some forages such as sorghum grain, and great millet (SIAP, 2020).

At the state level, Elota ranks third in production value of these agricultural goods, only after Culiacán and Navolato. This fact motivated us to fieldwork research by conducting surveys to determine whether the CSR activities of the companies, located in the municipality of Elota, have changed the perception of their working population regarding them, in terms of working conditions. The objective was to measure their levels of satisfaction, focusing the analysis on only two axes of ISO 26 000, human rights (DH) and labor practices (PL). The hypothesis was that the working population recognizes the social responsibility actions of companies regarding labor practices and human rights, with a better perception (higher rating) of those implemented by agricultural companies in the primary sector, compared to those in other productive sectors.

MATERIALS AND METHODS

The design of the instrument was based on the job satisfaction survey for workers in the handling and packaging of fruit and vegetable products developed by Euroempleo (2012), derived from the items set out in the ISO 26 000 CSR guidelines, and it was adapted to the needs of the work. The designed survey was applied to 400 people over 17 years of age in the municipality of Elota, from January to February 2018. The sample type selected was random, at the busiest points of the municipal capital.

In determining the sample, a sampling error of 5% was considered for intermediate proportions ($p=q=0.5$) and 3% for extreme proportions of $p=0.9$ and $q=0.1$, for a confidence level (d) higher than 95% ($k=2$), under the assumption of the infinite

⁵Tipo de cambio 20.4752 pesos por USD. Diario Oficial de la Federación del 25 de febrero de 2021. https://www.dof.gob.mx/indicadores_detalle.php?cod_tipo_indicador=158&dfecha=25%2F02%2F2021&hfecha=25%2F02%2F2021. ♦ Exchange rate 20.4752 pesos per USD. Official Gazette of Mexican Federation (in Spanish, DOF) https://www.dof.gob.mx/indicadores_detalle.php?cod_tipo_indicador=158&dfecha=25%2F02%2F2021&hfecha=25%2F02%2F2021; February 25, 2021.

percepción mejor (calificación mayor) de las realizadas por las empresas agrícolas del sector primario, en comparación con las de otros sectores productivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del instrumento tomó como base el cuestionario de satisfacción laboral de los trabajadores de manipulado y envasado de productos hortofrutícolas desarrollado por Euroempleo (2012), derivado de los ítems planteados en las guías RSE de la ISO 26 000, y se adaptó a las necesidades del trabajo. El cuestionario diseñado se aplicó a 400 personas mayores de 17 años en el municipio de Elota, de enero a febrero de 2018. El tipo de muestra seleccionado fue aleatorio simple, en los puntos más concurridos de la cabecera municipal.

En la determinación de la muestra se consideró un error de muestreo de 5% para proporciones intermedias ($p=q=0.5$) y de 3% en proporciones extremas de $p=0.9$ y $q=0.1$, para un nivel de confianza (d) superior al 95% ($k=2$), bajo el supuesto de carácter infinito de la población. Los resultados adecuados para este tipo de estudios se obtienen de la aplicación de la fórmula de cálculo de tamaño muestral aplicable a poblaciones infinitas (Malhotra, 2004):

$$N = \frac{k^2 pq}{d^2}$$

donde: N es el tamaño muestral, k es el número de desviaciones típicas para comprender en la distribución normal la probabilidad inferencial elegida ($k = 2$ para una probabilidad de 95.6%); " p " es la proporción observada en la encuesta de ocurrencia de un determinado suceso; y " q " es la proporción de ocurrencia del suceso opuesto a " p ", tal que " $q = 1 - p$ ".

El cuestionario se estructuró con 22 preguntas en 3 bloques temáticos. El primero relativo a características generales de las personas entrevistadas (edad, sexo, estado civil, lugar de origen del entrevistado, localidad actual de residencia, hablante de lengua indígena, salario mensual y servicios del hogar). En el segundo apartado se analizó la situación y condiciones laborales del encuestado (duración de la jornada, cobertura y acceso a seguro, etc.) y nivel de satisfacción con el trabajo. En el tercer bloque, relativo al nivel de conocimiento de los trabajadores y la medición de la satisfacción con las condiciones laborales de las empresas, se les solicitó evaluar algunas afirmaciones según la escala (1 a 5) de calificación de percepción de Likert (Matas, 2018). En dicha escala, 1 significa desacuerdo total y 5 acuerdo total, y se usó para medir las percepciones de la población trabajadora del municipio de Elota sobre el nivel de cumplimiento que las empresas alcanzan,

nature of the population. The appropriate results for this type of study are obtained by applying the formula for calculating the sample size applicable to infinite populations (Malhotra, 2004):

$$N = \frac{k^2 pq}{d^2}$$

where: N is the sample size; k is the number of standard deviations to understand the chosen inferential probability in the normal distribution ($k = 2$ for a probability of 95.6%); " p " is the observed proportion in the occurrence survey of a given event; and " q " is the proportion of occurrence of the event opposite to " p ", such that " $q = 1 - p$ ".

The survey was constructed with 22 questions in 3 thematic blocks. The first one related to general characteristics of the interviewees (age, sex, marital status, place of origin of the interviewee, current place of residence, indigenous language speaker, monthly wage and household services). The second section analyzed the respondent's work situation and conditions (length of workday, access to insurance and coverage, etc.); and level of job satisfaction. In the third block, related to the level of knowledge of the workers and the measurement of satisfaction with the working conditions of the companies, they were asked to evaluate some statements according to the scale (1 to 5) of Likert perception rating (Matas, 2018). In this scale, 1 means total disagreement and 5 total agreement, and was used to measure the perceptions of the working population of the municipality of Elota on the level of compliance that the companies achieve, according to the CSR guidelines, with eight items specifically in the axes of labor practice (PL) and human rights (DH).

For data analysis, the SPSS Statistics v. 23.0 (IBM, 2017) statistical program was used. In addition to providing descriptive statistics (mean, mode, median, maximum, minimum and standard deviation) of the variables considered, and the absolute (FA) and relative (FR) response frequencies, this program allowed an analysis of variance (ANOVA) with F-Snedecor. Also, the calculation of contingency tables, and the analysis of directional relationships between categorical variables with the Chi-square test, and its Fisher correction.

RESULTS AND DISCUSSION

The sample consisted of 203 men and 197 women, equivalent to 50.7% and 49.3%, respectively, of the total number of interviewees. The population is characterized by being young with an average age of 35 years, 52.5% are married; the level of education is low (42.8% have no education or only elementary

según las guías de RSE, en ocho ítems específicos de los ejes de práctica laboral (PL) y derechos humanos (DH).

Para el análisis de los datos se usó el programa estadístico SPSS Statistics v. 23.0 (IBM, 2017). Además de aportar estadísticos descriptivos (media, moda, mediana, máximo, mínimo y desviación típica) de las variables consideradas y las frecuencias de respuesta absolutas (FA) y relativas (FR), este programa permitió realizar un análisis de la varianza (ANDEVA) con F-Snedecor. También, el cálculo de tablas de contingencia y el análisis de relaciones direccionales entre las variables categóricas, con la prueba de Chi-cuadrada y su corrección de Fisher.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra quedó conformada por 203 hombres y 197 mujeres, equivalentes respectivamente al 50.7% y 49.3% del total de encuestados. La población se caracteriza por ser joven con una media de 35 años, 52.5% son casados; el nivel de estudios es bajo (42.8% no tiene estudios o solo la primaria). El 16.0% hablan la lengua indígena náhuatl, la estructura familiar promedio tiene 4.2 personas y el ingreso familiar mensual es \$11 084.3 pesos MXN (\$541.35 USD), equivalente a 4.2 salarios mínimos por día (Cuadro 1). Con excepción de los ingresos, los resultados son similares a los obtenidos por la encuesta intercensal 2015, la cual indicó una edad media de 36 años de los jornaleros agrícolas y escolaridad promedio baja de 6.2 años (COLMEX, 2017).

Elota es un municipio con flujos de migración temporal altos de septiembre a mayo, desde municipios y estados circundantes a Sinaloa. Incluso, algunos migrantes ya se establecieron de manera permanente en el municipio⁶. Esto se evidenció en las respuestas sobre la entidad de origen: 55% indicaron ser originarios de Sinaloa, 25.5% de Guerrero, 6.4% de Veracruz y 5.8% de Oaxaca. El 7.3% restante proviene de Michoacán, Puebla, Zacatecas, Jalisco, Baja California, Chiapas, Morelos, Durango, Chihuahua, Nayarit y Sonora. El 27.5% son solteros y 52.3% casados, en tanto 42.8% posee un nivel de escolaridad bajo, 23% con primaria terminada e incompleta 14.8%. El 43% manifestó tener una sola habi-

school). A 16.0% speak the indigenous Nahuatl language, the average family structure has 4.2 people, and the monthly family income is \$11 084.3 MXN pesos (\$541.35 USD), equivalent to 4.2 minimum wages per day (Table 1). Except income, our results are similar to those obtained by the 2015 intercensal survey, which indicated an average age of 36 years in agricultural laborers, and a low average schooling of 6.2 years (COLMEX, 2017).

Elota is a municipality with high temporary migration flows from September to May, from municipalities and states surrounding Sinaloa. Some migrants have even settled permanently in the municipality⁶. This was evident in the responses regarding the entity of origin: 55% indicated that they were born in Sinaloa, 25.5% were from Guerrero, 6.4% from Veracruz, and 5.8% from Oaxaca. The remaining 7.3% were from Michoacán, Puebla, Zacatecas, Jalisco, Baja California, Chiapas, Morelos, Durango, Chihuahua, Nayarit and Sonora. The 27.5% are single and 52.3% are married, while 42.8% have a low level of education, 23% have completed elementary school and 14.8% have not completed it. The 43% percent reported only one room in their homes. The coverage of basic services is ample, drainage (98.8%), piped water (99.5%), electricity (99.8%), sanitation (98.3%) and cement floor (95.5%).

Labor situation and job satisfaction

Of the sample, 94.5% were active workers, while 5.5% were not active. In this town, 58.7% of the population works in the primary sector. In this group were found the 195 surveyed day laborers, plus other 27 people residing in the municipality, who are engaged in the activity, and manage various types of agriculture and livestock production. Other 10.6% of the population is engaged in the secondary sector, some interviewees work in packing companies, or manufacturing of inputs for the agricultural sector. And 30.7% is employed in the service sector, with workers in public administration, engaged in

⁶Elota es el municipio del estado de Sinaloa con porcentaje mayor de población nacida en otra entidad o país, con una tasa de 28.7%; este indicador es 10.1% en Sinaloa. También destaca por contar con la edad media de población más joven, 23 años, mientras el promedio estatal es de 28 años. (INEGI, 2015). ♦ Elota, in the state of Sinaloa, is the municipality with the highest percentage of population born in another state or country, with a rate of 28.7%; this indicator is 10.1% in Sinaloa. It also stands out for having the youngest average age of population, 23 years, while the state average is 28 years. (INEGI, 2015).

Cuadro 1. Características socio demográficas[†] de la población trabajadora del municipio de Elota, Sinaloa, México, en 2018.

Table 1. Socio demographic features[†] of the working population of the municipality of Elota, Sinaloa, Mexico, in 2018.

Variable		FA	FR (%)			
Género	Hombre	203	50.7			
	Mujer	197	49.3			
Etnia	No	336	84.0			
Indígena	Si	64	16.0			
Habla	No	336	84.0			
Dialecto	Si	64	16.0			
		FA	FR(%)	FA	FR (%)	
Edad (años)	17-21 años	82	20.5	Baja (17-25)	133	33.3
	22-27 años	77	19.3			
	28-36 años	81	20.3	Media (26-38)	132	33.0
	37-45 años	79	19.8			
	46-82 años	81	20.3	Alta (39-82)	135	33.8
Estado civil	Soltero	110	27.5	Soltero	110	27.5
	Casado	209	52.3			
	Unión Libre	64	16.0	Otro estado civil	290	74.5
	Divorciado	7	1.75			
	Viudo	10	2.5			
Nivel de estudios	Sin estudios	20	5.0			
	Primaria incompleta	59	14.8	Bajo	171	42.8
	Primaria completa	92	23.0			
	Secundaria	94	23.5	Medio	180	45.0
	Bachillerato	86	21.5			
	Universidad	45	11.3	Alto	49	12.3
	Posgrado	4	5.0			
Total		400	100.0	Total	400	100.0

[†]Establecidas a partir de los datos de la investigación. FA: Frecuencia absoluta. FR: Frecuencia relativa en porcentaje. ♦ [†]Established from research data. FA: Absolute frequency. FR: Relative frequency in percentage.

tación en su vivienda. La cobertura servicios básicos es amplia, drenaje (98.8%), agua entubada (99.5%), energía eléctrica (99.8%), sanitario (98.3%) y piso de cemento (95.5%).

Situación laboral y satisfacción con el trabajo

El 94.5% de la muestra se encontraba activa en términos laborales, mientras que 5.5% no estaban activos. En este enclave, 58.7% de la población labora en el sector primario, en cuyo grupo se encuentran los 195 jornaleros encuestados y 27 personas residentes en el municipio que se dedican a la actividad y gestionan diversos tipos de aprovechamientos agrícolas o ganaderos. De la población entrevistada, 10.6% se dedica al sector secundario, los encuestados respondieron que trabajan en empresas empacadoras

other services such as transportation or commerce. This distribution is similar to that estimated by the Intercensal Survey (2015) which identified 57.66% of the economically active population of the municipality in the primary sector, 7.28% in industrial activities, 33.69% work in services, and 1.37% is unspecified.

It is interesting to notice, in the relative frequencies by sector (Table 2) that of the workers (FR=58.7%) in the primary sector, 87.4% are agricultural day laborers, and 12.6% are employed in other activities specific to the sector such as livestock, or are farm owners. The strong influence of agriculture was also identified, since 55.5% of those employed in the industry are located in packing plants (a complementary activity in the production of fruits and vegetables), and 45.5% in other industries. In

o de fabricación de insumos para el sector agrícola; y 30.7% se emplea en el sector servicios, con trabajadores en la Administración pública dedicados a otros servicios como el transporte o el comercio. Esta distribución es similar a la estimada por la Encuesta Intercensal (2015) que identificó 57.66% de la población económicamente activa del municipio en el sector primario, 7.28% en actividades industriales, 33.69% trabaja en servicios y 1.37% no especificado.

Es interesante notar, en las frecuencias relativas por sector (Cuadro 2) que de los trabajadores (FR=58.7%) en el sector primario, 87.4% son jornaleros agrícolas y 12.6% se emplean en otras actividades propias del sector, como la ganadería o son propietarios de ranchos agrícolas. También se identificó la influencia fuerte de la agricultura, toda vez que 55.5% de los empleados en la industria se localizan en las empacadoras (actividad complementaria en la producción de frutas y hortalizas), y 45.5% en otras industrias. En el sector terciario o de servicios (FR=30.7%) predominan las actividades comerciales que emplearon al 62.8%, otros servicios 20.8% y en la administración pública 16.4%. Lo anterior señala el crecimiento de la población ocupada en el sector primario del municipio que, en 2010 era 48% de la PEA, el sector industrial 9.4% y 42.6% en el sector servicios (SEDESOL, 2010a).

El 57.9% de los jornaleros trabaja de 35 a 48 h a la semana, y 34.4% sobrepasa las 48 h. En otras ocupaciones, 41.5% lo hace entre 35 y 48 h, y los que trabajan más de 48 h representa 27.8%, y 13.6%

the tertiary or service sector (FR=30.7%), 62.8% were employed in commercial activities, 20.8% in other services and 16.4% in public administration. The aforementioned points to the growth of the population employed in the primary sector of the municipality, which was 48% of the PEA in 2010, 9.4% in the industrial sector, and 42.6% in the service sector (SEDESOL, 2010a).

The 57.9% of laborers work 35 to 48 h per week, and 34.4% work more than 48 h per week. In other occupations, 41.5% work between 35 and 48 h, and those who work more than 48 h represent 27.8%, and 13.6% work 15 to 34 h per week. With the Chi-square test ($\chi^2 = 40.332$; $\alpha = 0.000$), a positive relationship was found between being a day laborer and working full days and overtime. That is, the agricultural day laborer works on average more hours than people with different occupations. Although, there was no significant relationship ($\chi^2 = 0.418$; $\alpha = 0.571$) between a medical care entitlement (social security) and being an agricultural laborer or not; in this sector 13.3% of day laborers reported that they not have health services. When compared to other sectors (Table 3); these data (15.6%) show greater informality in those other sectors.

On a national scale, agricultural workers work an average of 37 h, men 38 h, and women 30 h (INEGI, 2015). The Mexican labor laws (Ley Federal del Trabajo; DOF, 2019) states in Article 61 the duration of 8 h of the daytime workday, and in Art. 69 it is established that for every 6 days worked

Cuadro 2. Sector y actividad laboral[†] de la población del municipio de Elota, 2018.
Table 2. Sector and labor activity[†] of the population in the municipality of Elota, 2018.

Actividad	FA	FR (%)	Sector	FA	FR (%)
Activos	378	94.5			
No activos	22	5.5			
Total encuestados	400	100			
Jornalero agrícola	195	87.4	Primario	222	58.7
Otros del sector agrícola y ganadero	27	12.6			
Trabajador en una empacadora	22	55.5	Secundario	40	10.6
Otras actividades industriales	18	45.5			
Comercio	73	62.9	Servicios	116	30.7
Administración pública	19	16.4			
Otros Servicios	24	20.7			
Total activos	378	100.0	Total	378	100.0

[†]A partir de los datos de la encuesta aplicada. ♦ [†]From data of the conducted survey.

trabaja de 15 a 34 h semanales. Al aplicar la prueba de Chi-cuadrada ($\chi^2= 40.332$; $\alpha=0.000$) se encontró una relación positiva entre ser jornalero y laborar jornadas completas y horas extraordinarias. Es decir, el jornalero agrícola trabaja en promedio más horas que las personas con ocupaciones diferentes. Aunque no hubo relación significativa ($\chi^2= 0.418$; $\alpha=0.571$) entre tener derecho-habienencia (seguridad social) y ser o no jornalero agrícola; en este sector el 13.3% de los jornaleros manifestó no tener servicio de salud. En cambio, este valor es 15.6% en otros sectores (Cuadro 3), de modo que los datos muestran una informalidad mayor en esos sectores.

En escala nacional los trabajadores agrícolas laboran en promedio 37 h, los hombres 38 h y las mujeres 30 h (INEGI, 2015). La Ley Federal del Trabajo (DOF, 2019) señala en el artículo 61 la duración de 8 h de la jornada diurna, y en el Art. 69 se establece que por cada 6 días laborados se tiene derecho a uno de descanso, por lo que una jornada laboral semanal alcanza 48 h. Lo anterior indica que los jornaleros agrícolas desempeñan jornadas de trabajo que cumplen con la legislación laboral vigente.

La derecho-habienencia representa el acceso a los servicios de salud y seguridad social establecidos en la Ley del Seguro Social, capítulo X de la Seguridad Social en el Campo, artículos del 234 al 239, los cuales establecen la seguridad social a los jornaleros agrícolas (CEDRSSA, 2019). En Elota, 86.7% de los jornaleros agrícolas manifestó tenerla y también 84.4%

there is the right to one rest day, so that a work week reaches 48 h. This indicates that agricultural laborers perform workdays that comply with current labor legislation.

Medical care entitlement represents access to health and social security services established in Ley del Seguro Social, Chapter X of Seguridad Social en el Campo, articles 234 to 239, which establish social security for agricultural day laborers (CEDRSSA, 2019). In Elota, 86.7% of agricultural day laborers reported that they have social security, and also 84.4% of workers in other sectors, which indicates that companies in different sectors do not a-hundred-percent comply with the obligations by law, one of the main axes in CSR programs.

Job satisfaction of agricultural day laborers

Few studies have been conducted in Mexico to understand the job satisfaction of agricultural workers, compared to research conducted in the industrial sector (Esparza *et al.*, 2016). In the primary sector in Elota, a higher job satisfaction is achieved, compared to other active sectors, with 3.8 average rating. This rating is equivalent to a mean response of about 4 points on a scale of 5, equivalent to agreeing with the statement of being satisfied overall with their job). In the industrial and service sectors, workers' mean ratings were 3.07 points, on a scale of 1 to 5 (Table 4).

Cuadro 3. Condiciones y duración de la jornada según tipología de trabajo[†] en el municipio de Elota, 2018.

Table 3. Conditions and duration of the workday according to work typology[†] in the municipality of Elota, 2018.

Condiciones	Jornaleros agrícolas		Trabajadores de otros sectores		Total	
	FA	FR (%)	FA	FR (%)	FA	FR (%)
Duración jornada laboral						
Cero horas	0	0.0	22	10.7	22	5.5
Menos de 15 h	8	4.1	13	6.3	21	5.3
De 15 a 34 h	7	3.6	28	13.7	35	8.8
De 35 a 48 h	113	57.9	85	41.5	198	49.5
Más de 48 h	67	34.4	57	27.8	124	31.0
Total	195	100.0	205	100.0	400	100.0
Derecho-habienencia						
No	26	13.3	32	15.6	58	14.5
Si	169	86.7	173	84.4	342	85.5
Total	195	100.0	205	100.0	400	100.0

[†]Construida a partir de los datos de la encuesta aplicada. ♦ [†]Designed from data of the conducted survey.

de los trabajadores en otros sectores, lo cual indica que las empresas de los distintos sectores no cumplen al cien por ciento con las obligaciones de ley, uno de los principales ejes en los programas de RSE.

Satisfacción laboral de los jornaleros agrícolas

En México se han realizado pocos estudios para conocer la satisfacción laboral de los trabajadores agrícolas, en comparación con investigaciones efectuadas en el sector industrial (Esparza *et al.*, 2016). En el sector primario de Elota se alcanza una satisfacción laboral mayor que en otros sectores activos, con 3.8 de valoración media. Esta calificación equivale a una respuesta media de cerca de 4 puntos en escala de 5, equivalentes a estar de acuerdo con la afirmación de estar satisfecho globalmente con su trabajo). En los sectores industrial y de servicios, las valoraciones medias de los trabajadores fueron de 3.07 puntos, en escala de 1 a 5 (Cuadro 4).

Los jornaleros valoran las condiciones laborales, la cordialidad y libertad de expresión en su grupo de trabajo; están motivados, se capacitan para realizar su trabajo, reciben información sobre riesgos laborales e incluso aprecian su sueldo. En todos estos criterios se identificaron valoraciones con una diferencia significativa entre la calificación media de jornaleros agrícolas y otros trabajadores (Cuadro 4), excepto en la variable que aborda la posibilidad de desarrollo profesional en su puesto de trabajo ($F=2,399$; $\alpha=0.122$).

Day laborers value the working conditions, cordiality and freedom of expression in their work group. They are motivated, are trained to perform their work, receive information on occupational hazards, and even appreciate their pay. In all these criteria, valuations were identified with a significant difference between the mean rating of agricultural laborers, and other workers (Table 4), except the variable that addresses the possibility of professional development in their job ($F=2.399$; $\alpha=0.122$). The important difference in the valuation by agricultural day laborers is that they have an adequate wage, higher than that other workers get. This is another relevant finding of our research. Even then, total valuation was 2.9 (on a scale of 1 to 5). The agricultural laborers surveyed reported earning an average of \$203.20 MXN pesos per day (\$9.92 USD), which is equivalent to 2.3 minimum wages in Mexico.

One explanation for the satisfaction of agricultural laborers in Elota, Sinaloa, comes around reduced options available to them to find other types of work. Both in their communities of origin and destination, the reason is their low educational level, something already described by Hernandez (2014) “The limitations derive firstly from their professional profile, and secondly, because the job offer is highly differentiated, that is, they are low-income, intermittent and strongly seasonalized jobs”. In Mexico, agricultural laborers are described as a vulnerable group, mostly peasants from marginalized

Cuadro 4. Valoración media del nivel de satisfacción laboral[†] según la ocupación del trabajador (escala de 1 a 5[†]).
Table 4. Average rating of the level of job satisfaction[†] according to employment (scale from 1 to 5[†]).

Respuesta	Jornaleros agrícolas	Trabajadores de otros sectores	Promedio
Está motivado y le gusta el trabajo que desarrolla	3.8	3.2	3.5
Las condiciones laborales en general son buenas	3.8	3.2	3.5
La relación con sus compañeros y jefes son de cordialidad	4.2	3.3	3.7
Puede expresar libremente sus opiniones en su grupo de trabajo	4.2	3.3	3.7
Se siente participe de los éxitos y fracasos de la empresa	3.4	3.0	3.2
Recibe la información necesaria para desempeñar correctamente su trabajo	4.4	3.3	3.8
Recibe información básica sobre prevención de riesgos laborales	4.4	3.1	3.7
La empresa proporciona oportunidades para su desarrollo profesional	3.0	2.8	2.9
Los sueldos son adecuados para lo que son en general en el país	3.3	2.4	2.9
Está satisfecho laboralmente con su trabajo	3.8	3.1	3.4

[†]Estimada a partir de los datos de la encuesta. Nota: [†]Indica nivel de acuerdo según escala de 1 a 5 (Likert (Matas, 2018)): 1=Totalmente en desacuerdo; 2=En desacuerdo; 3=Neutral; 4=De acuerdo; 5=Totalmente de acuerdo. ♦ [†]Estimated from survey data. Note: [†]Indicates level of agreement according to the Likert scale from 1 to 5 (Matas, 2018): 1=Strongly disagree; 2=Disagree; 3=Neutral; 4=Agree; 5=Strongly agree.

La diferencia importante en la valoración por los jornaleros agrícolas es contar con un sueldo adecuado, superior al que alcanzan otros trabajadores. Este es otro hallazgo relevante de nuestra investigación. Aun así, la valoración total es de 2.9 (en escala de 1 a 5). Los jornaleros agrícolas encuestados manifestaron ganar en promedio \$203.20 pesos MXN diarios (\$9.92 USD), lo cual equivale a 2.3 salarios mínimos en México.

Una explicación para la satisfacción de los jornaleros agrícolas en Elota, Sinaloa, gira en torno a las opciones reducidas de las cuales disponen para encontrar otro tipo de trabajo. Tanto en sus comunidades de origen como en las de destino, la razón es su nivel educativo bajo, algo ya descrito por Hernández (2014) "Las limitaciones se derivan en primer lugar de su perfil profesional y en segundo, porque la oferta de trabajo se encuentra altamente diferenciada, es decir, se trata de empleos de bajo nivel de ingresos, intermitentes y fuertemente estacionalizados". En México, los jornaleros agrícolas son calificados como un grupo vulnerable, en su mayoría campesinos provenientes de las regiones marginadas del país, con rezago educativo, condiciones de vida precarias (tanto en sus comunidades de origen como de destino); carencia de servicios básicos (drenaje, luz y agua entubada) e incluso, sin seguridad social y se ven forzados a dejar su hogar por falta de oportunidades, salarios bajos y dotación escasa de recursos naturales en sus lugares de origen.

En las comunidades de destino viven en galeras, habitaciones proporcionadas (de 4 x 4 m) por los empleadores y con baños compartidos por decenas de familias, con contratos informales pactados de manera verbal (Hernández, 2014; Rojas, 2012; SEDESOL, 2010b). Para los jornaleros encontrar un empleo estable es un anhelo; por ello las condiciones laborales pasan a un segundo plano, y que la empresa agrícola les proporcione un lugar para pernoctar es visto como un ahorro, a pesar de que éstas se encuentren en malas condiciones, aunque sea obligación del patrón de acuerdo con la Ley Federal del Trabajo (Hernández, 2014).

Las comunidades de origen mayoritario de los jornaleros migrantes son los estados de Oaxaca y Guerrero, que se caracterizan por ser entidades federativas con economías agrícolas minifundistas, de infra subsistencia, con problemas de erosión de suelo y con uso de tecnología rudimentario. Por lo tanto,

regions of the country, with educational lagging and precarious living conditions (both in their communities of origin and destination). There, they lack of basic services (drainage, electricity and piped water) and even no social security. Thus, they are forced to leave their homes due to lack of opportunities, low wages and scarce natural resources in their places of origin.

In the destination communities they live in galeras, rooms (4 x 4 m) provided by employers and with bathrooms shared by dozens of families, with informal contracts on verbal agreement (Hernández, 2014; Rojas, 2012; SEDESOL, 2010b). For day laborers, finding a stable job is a longing; therefore, working conditions go second. The fact that the agricultural company provides them with a place to spend the night is seen as savings, even if those are in poor conditions, although it is the employer's obligation according to Ley Federal del Trabajo (Hernández, 2014).

The communities of origin of most migrant laborers are the states of Oaxaca and Guerrero, which are characterized by smallholder, subsistence farming economies, soil erosion problems, and the use of rudimentary technology. Therefore, 60.1% leave their community of origin due to lack of employment, and another 24.7% due to insufficient income (SEDESOL, 2010b). For agricultural laborers in Elota, the limitations and lack of employment in their original communities, facts of better housing conditions, and job stability, generate a positive job satisfaction rating of CSR.

Knowledge and social assessment of fruit and vegetable companies.

In this survey, 75% of the participants worked or have worked at some point in their lives in the agricultural sector at the municipality of Elota, or other localities in Sinaloa (Table 5). Therefore, they are considered adequate informants, with direct knowledge about primary sector and this type of companies. This is evidence of the importance of Elota as a municipality dedicated to agriculture. It is therefore natural that 82.6% of the day laborers have close family members (brothers, uncles, sons, etc.) who also work in this agricultural spot. A 3.7% of the population with habitual residence in the municipality indicated that they have, or have

60.1% deja su comunidad de origen por escasez de empleo y otro 24.7% por insuficiencia de ingresos (SEDESOL, 2010b). Para los jornaleros agrícolas en Elota, las limitaciones y falta de empleo en sus comunidades de origen y el hecho de contar con condiciones mejores de vivienda y estabilidad en el trabajo, genera que la valoración de la satisfacción laboral de la RSE sea positiva.

Conocimiento y valoración social de las empresas hortofrutícolas

El 75% de los participantes en esta encuesta, trabajó o ha trabajado en algún momento de su vida en el sector agrícola del municipio de Elota o de otras localidades de Sinaloa (Cuadro 5). Por lo cual se consideran informantes adecuados, con conocimiento directo de este tipo de empresas y del sector. Esto es evidencia de la importancia de Elota como municipio con vocación agrícola. Por ello se aprecia natural que 82.6% de los jornaleros tengan familiares cercanos (hermanos, tíos, hijos, etc.) que trabajan en este enclave agrícola. El 3.7% de la población con residencia habitual en el municipio señaló tener o haber tenido un familiar trabajando en el sector agrícola. El 50.7% de los ciudadanos residentes con otros trabajos afirmó haber laborado como jornalero o empacador en algún momento de su vida. Un estudio comparativo de dos invernaderos de tomates en Zacatecas, México (Esparza *et al.*, 2016), identificó diferencias muy marcadas entre cada uno de ellos, en la valoración de

had a family member working in the agricultural sector. While 50.7% of the resident citizens with other jobs stated that they had worked as a day laborer, or packer at some point in their lives. A comparative study of two tomato greenhouses in Zacatecas, Mexico (Esparza *et al.*, 2016), identified very marked differences between each of them, in the valuation of job satisfaction and job integration. The aforementioned shows that day laborer work is attractive to young people with limited education, because it is close to their homes, and because of the little formal knowledge required to perform the job.

To find out how workers rate the companies involved in this activity, they were asked about “positive or negative image” in the survey, or both, and were asked to support their response with an idea, in order to obtain qualitative information about their perceptions. Fifty-seven percent of laborers reported having a positive image of agricultural enterprises, as did 74.1% of workers in other occupations (Table 6). In the total sample, 66.3% of the working population of Elota has a positive image of agricultural enterprises, while 33.80% expressed a negative one.

Among the ideas contributed by those who expressed a “positive image” of the municipality’s agricultural enterprises, 59.6% of the workers related them to job creation. Another 12.9% identified them with economy activation or with the multiplier effect they have on other activities, and 8.7% said that they are companies with quality products. Of

Cuadro 5. Vínculos de los encuestados con empresas del sector agrícola[†], según su ocupación.
Table 5. Type of linkage of interviewees to companies in the agricultural sector[†], by employment sector.

Vínculos	Jornalero agrícola		Trabajadores de otros sectores		Total	
	FA	FR (%)	FA	FR (%)	FA	FR (%)
Tiene personas cercanas que han trabajado						
No	34	17.4%	97	47.3%	131	32.8%
Si	161	82.6%	108	53.7%	269	67.3%
Ha trabajado en su localidad o Sinaloa						
No	0	0.0%	101	49.3%	101	25.3%
Si	195	100.0%	104	50.7%	299	74.8%
Total	195	100.0%	205	100.0%	400	100.0%

[†]Con base en los datos de la encuesta aplicada en la investigación. ♦ [†]Based on data from the conducted survey in this research.

satisfacción laboral e integración al trabajo. Esto da cuenta de que el trabajo de jornalero es atractivo para los jóvenes con poca escolaridad, porque es cercano a sus hogares, y por los pocos conocimientos formales que requieren para desempeñar el trabajo.

Para conocer cómo califican los trabajadores a las empresas de esta actividad, se les consultó en el cuestionario aplicado sobre “imagen positiva o negativa”, o ambas, y se les pidió sustentar su respuesta con una idea, para obtener información cualitativa sobre sus percepciones. El 57.9% de los jornaleros manifestó tener una imagen positiva de las empresas agrícolas, así como 74.1% de los trabajadores dedicados a otras ocupaciones (Cuadro 6). En el total de la muestra, 66.3% de la población trabajadora de Elota tiene una imagen positiva de las empresas agrícolas, en tanto 33.80% expresó una negativa.

Dentro de las ideas aportadas por quienes manifestaron una “imagen positiva” de las empresas agrarias del municipio, destaca que 59.6% de los trabajadores las relaciona con la creación de empleo. Otro 12.9% las identifica con activación de la economía o con el efecto multiplicador que tienen en otras actividades y 8.7% manifestó que son empresas con productos de calidad. En tanto que del 33.80% que manifestaron tener una “imagen negativa”, 37.1% consideró que los salarios son injustos; 12.4% está preocupado por el uso de agroquímicos y sus efectos sobre la salud de la población; 7.6% por la contaminación del ambiente; 8.6% las asocia a trabajo largo y agotador; el 4.8% de la muestra las relaciona con trabajo temporal y precario.

Respecto a la valoración media del nivel de cumplimiento de las medidas de Responsabilidad Social por las empresas agrícolas, al considerar solo prácticas laborales y derechos humanos, tanto jornaleros como otros trabajadores de Elota mostraron una valoración

the 33.80% who said they had a “negative image”, 37.1% considered that wages are unfair; 12.4% are concerned about the use of agrochemicals, and their effects on the health of the population; 7.6% about environmental pollution; 8.6% associate them with long and exhausting work; 4.8% of the sample relate them to temporary and precarious work.

Respect to the average evaluation of the level of compliance with Social Responsibility measures by agricultural companies, when considering only labor practices and human rights, both day laborers and other workers in Elota showed a similar average overall evaluation of CSR initiatives about companies in the sector (Table 7). Thus, agricultural day laborers evaluated them with 3.9 and other citizens with 3.8, resulting in an overall average of 3.9, which represents a minimal difference between day laborers and non-laborers, respect to the evaluation of CSR compliance.

The image of agricultural laborers regarding compliance with CSR is positive in the items on labor practices and human rights, with an average rating close to, or higher than 4 on a scale of 5, but the difference in means analyzed was not significant for any of the items. The aspect with the lower mean rating was the one referring to union action (PL3), both for day laborers and other workers. This is attributed to the lack of cohesion due to constant migration, precarious living conditions in their distant localities, and marked cultural differences. In addition, they work seasonally in the destination communities where they find employment, and this is a factor that makes it difficult for them to organize and defend their rights, in addition to their low educational level (SEDESOL, 2010b).

Regarding the Human Rights (DH) axis, agricultural day laborers evaluated it better than

Cuadro 6. Imagen general de las empresas[†] por la población de Elota, Sinaloa en la localidad según su empleo activo.

Table 6. General image of the companies[†] by the population of Elota, Sinaloa; at the locality and according to their active employment.

Imagen Positiva	Jornaleros agrícolas		Trabajadores de otros sectores		Total	
	FA	FR (%)	FA	FR (%)	FA	FR (%)
No	82	42.10%	53	25.90%	135	33.80%
Si	113	57.90%	152	74.10%	265	66.30%
Total	195	100%	205	100%	400	100%

[†]Estimada a partir de los datos de la encuesta. ♦ [†]Depicted from data of the survey.

media global similar de las iniciativas de RSE acerca de las empresas del sector (Cuadro 7). Así, los jornaleros agrícolas las evaluaron con 3.9 y otros ciudadanos con 3.8, lo cual da una media general de 3.9 que representa una diferencia mínima entre jornaleros y no jornaleros, respecto a la valoración del cumplimiento de la RSE.

La imagen de los jornaleros agrícolas sobre el cumplimiento de RSE es positiva en los ítems de las prácticas laborales y derechos humanos, con una valoración media cercana o superior a 4 en una escala sobre 5, pero la diferencia de medias analizada no fue significativa para ninguno de sus ítems. El aspecto en el cual se alcanzó una valoración media menor fue el referente a la acción sindical (PL3), tanto para jornaleros como para otros trabajadores. Esto se atribuye a la falta de cohesión por la migración constante, las condiciones de vida precarias en sus localidades, distantes y con diferencias culturales marcadas. Además, se añade que trabajan por temporadas en las comunidades de destino donde encuentran empleo, y este es un factor que dificulta la organización para la defensa de sus derechos, sumado a su nivel educativo bajo (SEDESOL, 2010b).

workers in other sectors, except the item of commitment to fight against informal labor (HR3); specifically in IMSS affiliation, referring to companies that do register employees and others that do not. On the DH1 discrimination item, the perception was lower among workers from other sectors, who believe that day laborers from Guerrero, Oaxaca, and Veracruz are placed in the worst jobs, which leads to labor segmentation by origin, and feminization of work.

However, this perception is not shared by agricultural laborers, who have a higher perception of equal treatment for all farm workers. In the fight against child labor (DH2), agricultural laborers have a higher value for companies in the sector that fight against child labor, because it is not allowed by the companies. This is a legal obligation; but they also report that there are companies in the sector that support attendance at daycare and educational centers, and even provide financial support and scholarships for their workers' children to study. In the last two items described, as well as in the item (DH4) on whether companies in the local agricultural sector protect workers from harassment

Cuadro 7. Valoración media de la población trabajadora de Elota del nivel de cumplimiento de las empresas agrícolas respecto a medidas de responsabilidad social[†], según la ocupación (Escala de 1 a 5).

Table 7. Average valuation by the working population of Elota on the level of compliance of agricultural companies respect to social responsibility measures[†], according to their employment (Scale from 1 to 5).

Valoración	Jornalero agrícola	Trabajadores de otros sectores	Total
PL1. En la contratación y relaciones laborales siguen las leyes del país, respetando el pago de la jornada, duración de jornadas, días de descanso, pago de aguinaldo, etc.	3.8	3.6	3.7
PL2. Las instalaciones agrícolas cuentan con servicios adecuados para los trabajadores (sanitarios, ventilación, etc.).	3.9	3.8	3.9
PL3. Los trabajadores tienen representantes sindicales, elegidos libremente.	2.8	3.0	2.9
PL4. Dan a sus trabajadores agrícolas equipos adecuados de protección contra el uso de agroquímicos y/o maquinaria.	3.9	3.9	3.9
DH1. No existe la discriminación por raza o grupo étnico, género y/ u orientación sexual.	4.5	4.1	4.3
DH2. Están comprometidas en la lucha contra el trabajo infantil, no proporcionan trabajo a niños.	4.5	4.0	4.3
DH3. Están comprometidas en la lucha contra el trabajo informal (proporciona a sus trabajadores Seguro Social).	3.7	3.9	3.8
DH4. Protegen a los trabajadores del acoso laboral (físico, verbal, sexual o psicológico, abuso o amenazas).	4.3	3.8	4.0

[†]Caracterizado a partir de los datos de la encuesta aplicada. Nivel de acuerdo según una escala de 1 a 5: 1=Totalmente en desacuerdo; 2=En desacuerdo; 3=Neutral; 4=De acuerdo; 5=Totalmente de acuerdo. PL=Práctica Laboral; DH=Derechos Humanos). PL (Práctica Laboral) y DH (Derechos Humanos). ♦ [†]Characterized from the data of the conducted survey. Level of agreement according to a scale of 1 to 5: 1=Strongly disagree; 2=Disagree; 3=Neutral; 4=Agree; 5=Strongly agree. PL=Labor Practice; DH=Human Rights). PL (Labor Practice) and DH (Human Rights).

Respecto al eje de Derechos Humanos (DH), los jornaleros agrícolas lo evaluaron mejor que los trabajadores de otros sectores, excepto en el ítem del compromiso en la lucha contra el trabajo informal (DH3); en específico en la afiliación al IMSS, al referir empresas que sí realizan el registro y otras que no lo hacen. Respecto al ítem DH1 discriminación, la percepción de valoración fue menor por los trabajadores de otros sectores, quienes opinan que a los jornaleros provenientes de Guerrero, Oaxaca y Veracruz, les colocan en los peores puestos de trabajo, lo que da pie a una segmentación laboral por origen y feminización del trabajo.

Sin embargo, esta percepción no la comparten los jornaleros agrícolas, quienes tienen una percepción más elevada de un trato igualitario para todos los trabajadores del campo. En la lucha contra el trabajo infantil (DH2), los jornaleros agrícolas valoran de manera más elevada a las empresas del sector que luchan contra el trabajo infantil y los niños no laboran en esta actividad, porque no es permitido por las empresas. Esta es una obligación legal; pero además relatan que existen empresas del sector que apoyan la asistencia a guarderías y centros educativos, e incluso aportan apoyos económicos y becas para que los hijos de sus trabajadores estudien. En los dos últimos ítems descritos, así como en el referente (DH4) a si las empresas del sector agrícola local protegen a los trabajadores del acoso laboral, es ligeramente superior el nivel de acuerdo con esa afirmación entre jornaleros agrícolas que entre otros trabajadores. Las diferencias de medias entre ambos tipos de encuestados resultaron significativas.

Con las ocho valoraciones del nivel de acuerdo con el nivel de compromiso en sus prácticas laborales (PL) y con los derechos humanos (DH) en las empresas del sector agrícola, se estimó un índice global de cumplimiento de medidas de RSE en las empresas del sector agrícola del municipio de Elota que alcanzó en ambos casos una valoración media de 3.9 en una escala de 5. Los resultados identificados acerca de la valoración positiva de la población trabajadora del municipio de Elota de las acciones de responsabilidad social que las empresas desarrollan, confirmó la hipótesis de una valoración elevada por el conjunto de encuestados. De manera más detallada en lo referente a prácticas laborales y derechos humanos, las empresas agrícolas recibieron valoración alta en su nivel de desempeño, y en general esta fue superior entre quienes son jornaleros agrícolas.

at work, the level of agreement with this statement is slightly higher among agricultural laborers than among other workers. The mean differences between the two types of respondents were significant.

With the eight evaluations of the level of agreement with the level of commitment to labor practices (PL) and human rights (DH) in the agricultural sector companies, an overall index of compliance with CSR measures in the agricultural sector companies at the municipality of Elota was estimated, which in both cases reached an average rating of 3.9 on a scale of 5. Results regarding the positive evaluation of the working population of the municipality of Elota about the social responsibility actions developed by companies, confirmed the hypothesis of a high evaluation by all respondents. In more detail, in terms of labor practices and human rights, agricultural companies received a high evaluation in their level of performance; in general this was higher among those who are agricultural laborers.

CONCLUSIONS

The voluntary nature of social responsibility has not been a limiting factor for its adoption among companies in the agricultural town of Elota, Sinaloa. Actions in this area have been a key in the development of a competitive strategy to change the perception of the companies by their interested parties. As it was the case of this working population, which positively valued the compliance of their employers with applicable legislation in terms of working conditions and respect for human rights.

The prohibition of child labor and the recognition of the contribution of companies to the generation of jobs were particularly important. Along with the well-being of agricultural day laborers and social security rights through their affiliation to the IMSS, which gives them health care entitlement. Comprehensive care for agricultural workers is a pending issue in Mexico, but the efforts made by producers committed to social responsibility are bearing fruit and driving development.

The implementation of these standards facilitates company permanence in the global market in medium and long terms, and encourages ethical behavior in the agribusiness sector. Positive results of corporate social responsibility (CSR) should be strengthened with the design of public programs in coordination with the private sector, to promote

AGRADECIMIENTOS

Este artículo forma parte del proyecto de investigación “Gobernanza de calidad en las cadenas agroalimentarias. Análisis comparativo de los territorios agroexportadores de España”, financiado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Proyectos de excelencia (CSO2017-85507).

CONCLUSIONES

El carácter voluntario de la responsabilidad social no ha sido una limitante para su adopción entre las empresas del enclave agrícola de Elota, Sinaloa. Las acciones en esta materia han sido fundamentales en el desarrollo de la estrategia competitiva para cambiar la percepción de las empresas por sus partes interesadas. Como fue el caso de esta población trabajadora, al valorar de forma positiva el cumplimiento de sus empleadores con la legislación aplicable en términos de condiciones laborales y respeto de los derechos humanos.

De particular importancia son la prohibición del trabajo infantil y el reconocimiento de la contribución de las empresas a la generación de empleos; y a la salud y bienestar de los jornaleros agrícolas con su afiliación al IMSS, las cual les genera derecho-habienencia. La atención integral de los trabajadores agrícolas es una asignatura pendiente en México, pero el esfuerzo realizado por productores comprometidos con la responsabilidad social rinde frutos, e impulsa el desarrollo.

La implementación de los estándares facilita su permanencia en el mercado global en el mediano y largo plazo, y fomenta un comportamiento ético en el sector empresarial de los agronegocios. Los resultados positivos de la responsabilidad social empresarial (RSE) deben fortalecerse con el diseño de programas públicos en coordinación con el sector privado, para promover su adopción en empresas de todos los sectores económicos. Esto, como un instrumento efectivo para mejorar las condiciones laborales, la participación sindical, el desarrollo laboral y para garantizar los derechos humanos de los trabajadores en México.

LITERATURA CITADA

AHIFORES (Alianza Hortofrutícola Internacional para el Fomento de la Responsabilidad Social, A.C.). 2019. Certificación Empresa Agrícola Responsable (CEAR). <https://ahifores.com/wp-content/uploads/2020/11/01-CEAR-version-2.0-Espanol.pdf> (Consulta: noviembre 2020).

standards adoption by companies in all economic sectors. This is an effective instrument for improving working conditions, union participation, labor development, and guarantee of human rights of workers in Mexico.

—End of the English version—



- Avendaño R., B. D., O. A. Sierra L., y M. O. Lobo R. 2015. Una estimación de la responsabilidad social empresarial en empresas hortofrutícolas de Baja California, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6: 563-576.
- CEDRSSA (Centro de Estudios para el Desarrollo Rural Sustentable y la Soberanía Alimentaria). 2019. Reporte Jornaleros en México. México. 26 p. http://www.cedrssa.gob.mx/post_n-jornaleros_en_mn-xico-n.htm (Consulta: noviembre 2020).
- COLMEX (El Colegio de México) 2017. Apuntes para la equidad (Junio) No.3. México. 4 p. <https://trades.colmex.mx/apuntes3> (Consulta: noviembre 2020).
- CONSEVAL (Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social). 2018. Ficha de Monitoreo 2017-2018. Programa de atención a jornaleros agrícolas. México. https://www.conseval.org.mx/Evaluacion/Documents/EVALUACIONES/FMyE_2017_2018/FMyE_20_S065.pdf (Consulta: agosto 2020).
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2019. Ley Federal del Trabajo. México. 30 de abril de 2019. <https://docs.mexico.justia.com/federales/ley-federal-del-trabajo-2019.pdf> (Consulta: agosto 2020).
- Eleven Rivers, 2020. Esquema de Certificación. Responsabilidad Social. <https://www.elevenrivers.org/espanol/> (Consulta: noviembre 2020).
- Esparza J., C., J. A. Zegbe D., D. Ruiz Ch. R., y P. G. García Z. 2016. Calidad de vida laboral de jornaleros dedicados a la producción de tomate fresco bajo invernadero. *Rev. Cubana Sal. y Trab.* 17. 30-35.
- Euroempleo. 2012. Cuestionario de satisfacción laboral: Herramienta práctica. Unión Europea. Junta Andalucía. Documentos Anexo VII. Cuestionario sobre satisfacción laboral de los trabajadores de manipulado y envasado hortofrutícola. http://www.juntadeandalucia.es/servicioandaluzdeempleo/web/gestion_colaboradores/documents/151. (Consulta: octubre 2017).
- Hernández T., J. M. 2014. Condiciones de trabajo e ingreso en la agricultura intensiva mexicana. *Rev. Anls. Econ.* 29: 137-160.
- IBM (International Business Machine). 2017. Statistical Package for Social Sciences. (SPSS versión 23). <https://www.ibm.com/support/pages/downloading-ibm-spss-statistics-23> (Consulta: mayo 2019).
- IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social). 2019. Memoria Estadística. Capítulo 1. Asegurados. <http://www.imss.gob>

- mx/conoce-al-imss/memoria-estadistica-2019 (Consulta: agosto 2020).
- INEGI (Instituto Nacional de Geografía e Informática). 2015. Principales resultados de la Encuesta Intercensal 2015, Sinaloa, México. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/inter_censal/estados2015/702825079895.pdf (Consulta: abril 2018).
- ISO (International Organization for Standardization). 2010. ISO 26 000 Responsabilidad Social. <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:26000:ed-1:v1:es> (Consulta: marzo 2018).
- Lizcano-Prada, J. y J. Lombana. 2018. Enfoques de la responsabilidad social empresarial en los agronegocios. *Estudios Gerenciales*. 34: 347-356. <https://doi.org/10.18046/j.estger.2018.148.2657> (Consulta: enero 2020).
- Malhotra, N. K. 2004. *Investigación de Mercado un Enfoque Aplicado*. Pearson Educación, México. 816 p.
- Matas, A. 2018. Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión. *Rev. Elect. Inv. Educativa*. 20: 38-47.
- OEA (Organización de los Estados Americanos) 2020. SICE: Sistema de Información sobre Comercio Exterior. http://www.sice.oas.org/TPD/USMCA/USMCA_s.ASP (Consulta: junio 2020).
- OIT (Organización Internacional del Trabajo). 1998. Declaración de la OIT relativa a los principios y derechos fundamentales en el trabajo y su seguimiento. <https://www.ilo.org/declaration/thedeclaration/textdeclaration/lang--es/index.htm> (Consulta: noviembre 2020).
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2020. Pacto Global. Objetivos del Desarrollo Sostenible. <https://www.pactomundial.org.mx/> (Consulta: abril 2018).
- Posadas S., F. 2018. Mercado de trabajo de los jornaleros agrícolas en México. *Región y Sociedad*. Vol 30. 72: 1-25.
- Rojas R., T. 2012. Bienestar social de las familias agrícolas migrantes: acciones gubernamentales y de las empresas agroexportadoras. *Iberoforum*. 7: 35-71.
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2010a. Economía Elota, Unidad de Microrregiones. <http://www.microrregiones.gob.mx/zap/Economia.aspx?entra=pdzp&ent=25&mun=008>. (Consulta: abril 2018).
- SEDESOL (Secretaría de Desarrollo Social). 2010b. Diagnóstico del Programa de Atención a Jornaleros Agrícolas. http://www.inapam.gob.mx/work/models/SEDESOL/Resource/1778/3/images/Diagnostico_PAJA.pdf. (Consulta: abril 2018).
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2020. Producción agropecuaria y pesquera. <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>. (Consulta: marzo 2020).